

Grundlegende Entwicklungen und Untersuchungen zur Mikro- und Nanostrukturierung durch Direct Laser Writing in Nanopositionier- und Nanomessmaschinen

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn
Johannes Kirchner, M.Sc.

- 1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske
- 2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte
- 3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Lehmann

Tag der Einreichung:	10.03.2020
Tag der wissenschaftlichen Aussprache:	15.06.2020

Danksagung

Die für diese Dissertationsschrift erfolgten Untersuchungen, Messungen, Konzepte und Ideen wurden am *Institut für Prozessmess- und Sensortechnik* der *Technischen Universität Ilmenau* durchgeführt und entwickelt. Für das entgegengebrachte Vertrauen und die Chance, innerhalb des Graduiertenkollegs *NanoFab* industrienah und lösungsorientiert promovieren zu dürfen, bedanke ich mich von Herzen bei meinem Doktorvater *Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske*. Für die wertvolle fachliche und zwischenmenschliche Unterstützung, die vielen gewinnbringenden Gespräche, die zahlreichen Ratschläge und sein bemerkenswertes Engagement der Förderung junger Wissenschaftler betreffend, gilt ihm ein besonderer Dank. Daneben möchte ich mich auch bei *Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Fröhlich* und *Prof. Dr.-Ing. habil. Roland Füßl* für die vielseitige Unterstützung während der letzten Jahre am Institut sowie für die Freundlichkeit, die einem jeden Mitarbeiter entgegengebracht wird, bedanken. Die Herzlichkeit des Führungsteams und unserer lieben Sekretärin *Cordula Höring*, verteilt sich im gesamten Kollegium und führt zu diesem wertvollen und zuvorkommenden Arbeitsklima. In besonderer Weise möchte ich mich diesbezüglich ebenfalls bei *Dr.-Ing. Uwe Gerhardt* bedanken, der mir mit seinem ausgeprägten technischen Verstand und seiner immerwährenden Hilfestellung die letzten Jahre ein wertvoller Mentor war. Für deine Geduld und die gemeinsame Zeit bin ich dir sehr verbunden. Darüber hinaus möchte ich *Gunter Krapf*, *Ingo Ortlepp*, *Rostyslav Mastylo* und *Sybille Bräuning* hervorheben, die mit ihrer stetigen Hilfsbereitschaft ebenfalls einen wertvollen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Den Kolleginnen und Kollegen des Graduiertenkollegs *Florian Fern*, *Oliver Dannberg*, *Martin Hofmann*, *Stephan Gorges*, *Laura Weidenfeller*, *Taras Sasiuk*, *Andreas Meister*, *Ralf Schienbein*, *Shraddha Supreeti*, *David Fischer*, *Christoph Weise* und *Xinrui Cao* danke ich herzlich für die wertvolle und bereichernde gemeinsame Zeit im Schützenhaus.

Ich danke *Sebastian*, *Julian*, *Daniel*, *Frank*, *Florian*, *Sven*, *Dominik* und *Benjamin* für die unvergessliche gemeinsame Jugend und euren individuellen Beitrag zu meinem heutigen Ich. Ein weiterer Dank gilt in besonderer Weise *Guido* und *Jaqueline*, die diese Arbeit während der gesamten Entwicklung verfolgt und immer weiter verbessert haben. Für den sprachlichen Feinschliff danke ich meiner lieben *Anja*, die sich, ohne zu zögern, für das Korrekturlesen meiner Arbeit zur Verfügung gestellt hat. All diese Freundschaften bilden durch ihre individuelle Unterstützung ein essentielles Fundament, welches es ermöglichte eine solche Arbeit zu erstellen.

Meinen wunderbaren Geschwistern *Katharina* und *Tobias* sowie ihren Partner und Kindern möchte ich für die hingebungs- und verständnisvolle familiäre Unterstützung über all die Jahre hinweg meinen tiefsten Dank aussprechen. Dieser gilt in besonderer Weise auch meiner liebevollen und starken Mutter *Barbara* und meinem geliebten, leider viel zu früh verstorbenen Vater *Helmut*. Ich vermisse dich sehr. Ein letztes Wort ist an meine wundervolle Partnerin *Tanja* gerichtet, die die letzten Jahre der räumlichen Trennung mit mir durchgestanden und mich stets durch ihre verständnisvollen und ermutigenden Worte unterstützt hat.

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden Entwicklungen und Untersuchungen zum Direct Laser Writing, einem maskenlosen lithografischen Bearbeitungsprozess, vorgestellt. Diese hochauflösende lasergestützte Strukturierungstechnik wird mit einer am *Institut für Prozessmess- und Sensortechnik* entwickelten *Nanopositionier- und Nanomessmaschine* kombiniert, die sich durch eine extrem hohe Ortsauflösung über einen sehr großen Arbeitsbereich auszeichnet. Durch die synergetische Verbindung des lithografischen Verfahrens mit der hochpräzisen Nano-Koordinatenmessmaschine, wird deren Anwendungsbereich vom präzisen Positionieren und Messen um das Strukturieren zunächst auf planaren und später auch auf gekrümmten Oberflächen, erweitert. Dabei steht das Erreichen geringster lithografisch erzeugter Strukturbreiten in der Größe beugungsbegrenzender Limitationen im Vordergrund der Arbeit.

Für die Einkopplung des Lithografielasers wird der Aufbau eines optischen Nanosensors verwendet. Die Sensorik dient der Antastung der Strukturierungsfläche und richtet die Probe auf wenige Nanometer genau zum Bearbeitungslaser aus. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass der bisher verwendete Fokussensor für diese Zwecke nicht gut geeignet ist. Aus diesem Grund widmet sich die Arbeit zusätzlich der Entwicklung eines neuen, differentiellen, chromatisch konfokalen und fasergekoppelten Abstandssensors, von der Konzeptfindung bis hin zur Inbetriebnahme. Die messtechnischen Untersuchungen des neuen Sensors zeigen, dass eine laterale Auflösung von $< 2 \mu\text{m}$ und eine axiale Auflösung von $< 1 \text{ nm}$ erreicht werden kann. Die Standardabweichung beträgt dabei weniger als 5 nm.

Das Basiskonzept des Messsystems wird im Verlauf der Arbeit dahingehend entwickelt, eine hochpräzise lithografische Applikation zu ermöglichen. Durch die systematische Verbesserung der lithografischen Prozessparameter ist es in Kombination mit dem neuen Messsystem möglich, Strukturbreiten von 600 nm und darunter zu erzeugen. In Zukunft soll der neue Sensor auch zur Strukturierung von Linsen, Freiformen und Asphären genutzt werden. Erste Untersuchungen dazu zeigen eine Neigungsabhängigkeit optischer Sensoren, die zu systematischen Messabweichungen und erhöhten lithografischen Strukturbreiten führen. Um die Grundlage lithografischer Anwendungen auf geneigten Oberflächen zu schaffen, werden verschiedene Ansätze zur Kompensation vorgestellt. Basierend auf den grundlegenden Untersuchungen und Erkenntnissen wird eine Reihe von Vorschlägen entwickelt, die in weiterführenden Arbeiten das Messsystem, den Direct Laser Writing-Prozess sowie die Anwendbarkeit dieser Technik auf gekrümmten Oberflächen verbessert.

Abstract

This thesis presents developments and investigations concerning Direct Laser Writing, a maskless lithographic process. This high-resolution, laser-based structuring technique is combined with a *nanopositioning and nanomeasuring machine* developed at the *Institute for process measurement and sensor technology*, which achieves an extremely high spatial resolution within a very large working range. The synergetic combination of the lithographic process and the high-precision nano-coordinate measuring machine expands its field of application from precise positioning and measuring to structuring, initially on planar surfaces, later also on curved surfaces. The main focus of this thesis is to realize smallest lithographically produced structure widths in the size of diffraction-limited restrictions.

The setup of an optical nanosensor is used for the coupling of the lithographic laser. The sensor is used to detect the structuring surface and to align the sample to the processing laser with an accuracy of a few nanometers. Earlier investigations have already shown that the currently used focus sensor is not well suited for these purposes. Therefore, this thesis is additionally aimed at the development of a new differential, chromatic confocal and fiber-coupled distance sensor, from conception to implementation. The metrological investigations of the new sensor show that a lateral resolution of $< 2\text{ }\mu\text{m}$ and an axial resolution of $< 1\text{ nm}$ can be achieved. The standard deviation is less than 5 nm.

The basic concept of the measuring system will be developed to enable a high-precision lithographic application. Due to the systematic improvement of the lithographic process parameters, it is possible to produce structure widths of 600 nm and less in combination with the new measuring system. In the future, the new sensor will also be used for the structuring of lenses, free-forms and aspheres. First investigations show a tilt dependence of optical sensors, leading to systematic measurement errors and increased lithographic structure widths. Different approaches for compensating this error are presented in order to create the fundamentals for lithographic applications on tilted surfaces. Based on the fundamental investigations and results, a series of proposals will be developed, which will improve the measuring system, the Direct Laser Writing process and the applicability of this technique on curved surfaces in further research.

Inhaltsverzeichnis

1	Stand der Technik	1
1.1	Einführung	1
1.2	Nanopositionier- und Nanomessmaschinen	2
1.3	Nanosensorik: Der Basissensor	4
1.3.1	Erweiterungen des Basissensors	6
1.3.2	Funktionstechnische Nachteile des Basissensors	8
1.4	Nanofabrikation - Grundlagen und Anwendungen	9
1.4.1	Moore'sches Gesetz	11
1.4.2	Direct Laser Writing	12
1.5	Ein-Photon-Polymerisation auf Basis der NPMM	15
1.5.1	Vorarbeiten und Funktionsnachweis	15
1.5.2	Einfluss der Belichtungs-dosis	17
1.6	Optische Nullpunktsensorik	21
1.6.1	Differentielle Laserfokussensorik	21
1.6.1.1	Astigmatische Fokusdetektion	21
1.6.1.2	Foucault'sche Fokusdetektion	22
1.6.2	Differentielle Konfokalsensorik	24
1.6.2.1	Mechanisch konfokale Sensoren	24
1.6.2.2	Chromatisch konfokale Sensoren	26
1.6.2.3	Modulierbar konfokale Sensoren	27
1.6.3	Weiterführende Literatur	28
2	Sensorentwicklung für das Direct Laser Writing	29
2.1	Motivation und Anforderungen	29
2.2	Basiskonzept des Sensors	31
2.3	Aufbau des Sensors	32
2.3.1	Konzeptanpassung	32
2.3.2	Die sensorische Einheit	34
2.3.3	Der Sensorkopf	36
2.3.4	Das Objektiv	38
2.3.4.1	Linsenauswahl	38
2.3.4.2	Berechnung der Dispersion und der Schnittweiten	39
2.3.4.3	Konstruktion und Aufbau	41
2.4	Funktionsnachweis	43
2.5	Messtechnische Untersuchungen	45
2.5.1	Funktionale Untersuchung der Objektive	45
2.5.2	Arbeitsbereich und axiale Auflösung	47
2.5.3	Laterale Auflösung	48
2.5.4	Wiederholpräzision	51
2.5.5	Experimentelle Verifizierung der sensorischen Funktionalität	52
2.5.6	Zusammenfassung der messtechnischen Eigenschaften	53

3	Optische Messabweichungen auf geneigten Oberflächen	55
3.1	Ursache der Messabweichung	55
3.2	Ansätze zur Fehlerkompensation	57
3.2.1	Konstruktiv: Mitneigen des Sensorkopfes	58
3.2.1.1	Miniaturisierung des Sensorkopfes.....	59
3.2.2	Empirisch: Ermittlung der Messabweichung	62
3.2.2.1	Messung des Oberflächenwinkels	62
3.2.2.2	Taktile Referenzmessung.....	65
3.2.2.3	Optische Vergleichsmessung.....	67
3.2.2.4	Empfehlungen für weitere Untersuchungen	68
4	Mikro- und Nanostrukturierung auf Basis der Konfokalsensorik	71
4.1	Setup und funktionaler Nachweis	71
4.2	Optimierung der Prozessparameter	73
4.2.1	Schnittweitenkorrektur	74
4.2.2	Resistauswahl	76
4.2.2.1	Prozessfolge beim Auftragen der Resiste	76
4.2.2.2	DLW-Resist für 405 nm	78
4.2.2.3	Verringerung der Resistschichtdicke	78
4.2.3	Strukturierungsdosis	79
4.2.3.1	Strukturierungsleistung am Objektivausgang	79
4.2.3.2	Ermittlung der idealen Dosis.....	80
4.3	Verringerung der Linienabstände	82
5	Weiterführende Arbeiten	85
5.1	Optimierung des konfokalen Messsystems.....	85
5.2	Erhöhung des lateralen Auflösungsvermögens	86
5.3	Kompensation der oberflächenwinkelabhängigen Messabweichungen	88
5.4	Optimierung der DLW-Lithografie.....	89
5.5	Direct Laser Writing auf gekrümmten Oberflächen.....	90
6	Zusammenfassung und Ausblick	93
	Literaturverzeichnis	97
	Abbildungsverzeichnis	111
	Tabellenverzeichnis	113
	Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	115

1

Stand der Technik

1.1 Einführung

Die ersten Konzepte für Nano-Koordinatenmessmaschinen (engl.: Nano-Coordinate measuring machines (*Nano-CMM*)) veröffentlichten Forscher des *National Institute of Standards and Technology* (NIST) im Jahr 1989 [1]. Die US-amerikanischen Wissenschaftler hatten das Ziel, Atom- und Molekülgrößen mit Hilfe eines adäquaten Koordinatenmessgeräts - der *molecular measuring machine* - aufzulösen. Auch Wissenschaftler des *Department of Precision Engineering* der *University of Tokyo* veröffentlichten Mitte der 90er Jahre eine Idee zur Umsetzung eines solch hochauflösenden Geräts [2]. Bereits damals konnte die Notwendigkeit dieser Maschinen für das 21. Jahrhundert in den Bereichen der Mikrorobotik, der Optiktechnologie und der Mikrofabrikation vorhergesagt werden [3, 4]. Einen der wichtigsten Anreize, die Messauflösung und Adressierbarkeit industriell immer weiter zu verbessern und neue Fabrikationsmethoden im mikro- und nanoskaligen Bereich zu entwickeln, wurde durch Gordon Moore's Formulierungen zur Entwicklung integrierter Schaltkreise (IC) im Jahr 1965 geschaffen. Er sagte voraus, dass sich die Komplexität von ICs und somit die Anzahl der Transistoren auf einem Mikroprozessor regelmäßig verdoppelt [5]. Trotz seiner Abstraktheit, entwickelte sich seine Vision zu einer Gesetzmäßigkeit, die inzwischen als *Moore's Gesetz* bekannt ist und deren Einhaltung der Industrie bis heute einen gewissen Wettbewerbsdruck bereitet [6]. Für die Vorreiter dieser Branche bedeutet das, die Forschung und Entwicklung in Richtung Nanopositionierung, -messbarkeit

und -bearbeitung auszuweiten und Möglichkeiten und Ideen zur präzisen maschinellen Adressierung zu entwickeln. Dies hat dazu geführt, dass sich die Anzahl der logischen Bauelemente eines ICs von etwa 2000 im Jahr 1971 auf 10 Milliarden im Jahr 2015 vergrößert hat [7]. Dank der Entwicklung in den Bereichen der hochpräzisen Fertigung, Messung und Positionierung konnten so beispielsweise die Taktraten von Prozessoren von 500 kHz (1971: *Intel 4004*) auf ca. 8,5 GHz (2014: *AMD FX 8370*) gesteigert werden [8]. Frühe Nano-CMM sahen ein Arbeitsvolumen von $V_A = 10 \text{ mm}^3$ bei einer Auflösung von $R = 10 \text{ nm}$ vor [2]. Zum Vergleich: Die *Optotech UPG-2000 CNC*, welche heute zur hochpräzisen Bearbeitung von Spiegeln für Weltraumteleskope genutzt wird, besitzt einen Arbeitsbereich von $V_A = 2500 \text{ mm} \times 3500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ [9]. Die erreichbare Ortsauflösung von Nano-Koordinatenmessmaschinen liegt inzwischen im Bereich weniger Picometer (*TU Ilmenau NPMM-200*: $R = 0,02 \text{ nm}$) [10].

Diese Präzision eröffnet ganz neue Anwendungsbereiche. Optische Bauelemente können präzise bearbeitet werden und bieten das Potential, durch gezielte Funktionsintegration ganze optische Baugruppen zu ersetzen und eine verbesserte Leistungsfähigkeit zu ermöglichen [11]. Solche Optikbauteile werden heute nicht mehr nur durch mechanische Ultrapräzisionsbearbeitung in Form geschliffen - detaillierte Mikrostrukturierung kann, präzise adressiert, mit Hilfe von Laserablationsverfahren individuell, schnell und anwendungsbezogen in das Substrat eingearbeitet werden. Dies ermöglicht beispielsweise auch die Fertigung hybrider diffraktiv-reflektiver optischer Bauelemente zur Laserstrahlformung. Was vorher durch eine ganze Gruppe abgestimmter und zueinander ausgerichteter Linsensysteme erreicht wurde, wird so nun von einem einzelnen, gezielt strukturierten Bauelement ermöglicht [12]. Die Miniaturisierung und die Vielzahl von Funktionen der kompakten Kameras in unseren mobilen Endgeräten wird daher nicht zuletzt auch durch angewandte Forschung in den Bereichen der Mikro- und Nanostrukturierung und der Präzisionspositionier- und -messtechnik vorangetrieben [13–15].

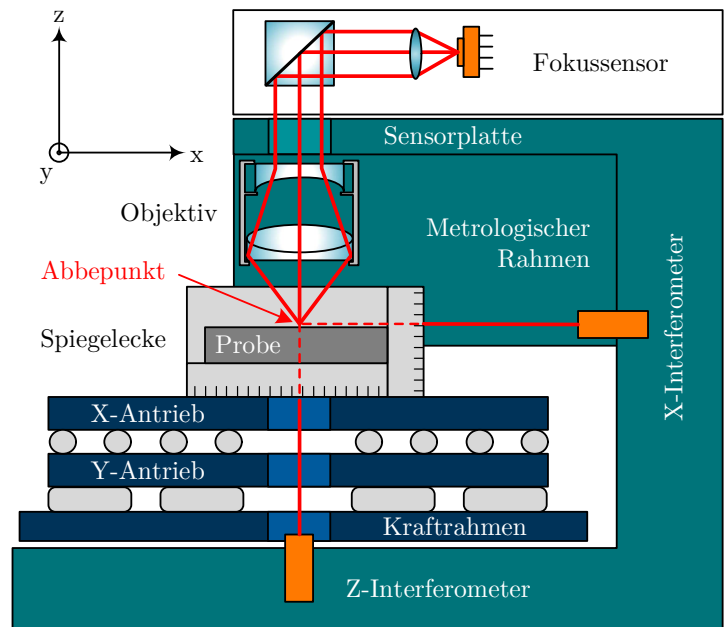
1.2 Nanopositionier- und Nanomessmaschinen

Das *Institut für Prozessmess- und Sensortechnik (IPMS)* der *Technischen Universität Ilmenau* und der *Sonderforschungsbereich SFB 622* haben sich ebenfalls der Entwicklung von Nano-CMM, den sogenannten *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen (NPMM)*, gewidmet. Im Laufe der Entwicklungszeit sind zwei Maschinentypen entstanden. Die *NMM-1* war die erste Maschine ihrer Form. Sie verfügt über einen Arbeitsbereich von $V_A = 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$. Diese Maschine kann heute, ausgerüstet mit

entsprechender Sensorik, Oberflächen und Konturen mit vergleichsweise großen lateralen Ausdehnungen bei einer Ortsauflösung von $R = 20 \text{ pm}$ messen. Mit der Entwicklung der *NPMM-200* wurde der messbare Arbeitsbereich auf $V_A = 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ vergrößert. Darüber hinaus kann dieser Maschinentyp im Vakuum betrieben werden.

Kennzeichnend für *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen* ist das Verhältnis von Ortsauflösung zu Arbeitsvolumen, die konsequente Einhaltung des Abbe'schen Komparatorprinzips während der Messung sowie die metrologische Rückführbarkeit, welche durch die stabilisierte Laserinterferometrie ermöglicht wird [16, 17]. Der Gesamtaufbau wird unter klimatisch stabilen Bedingungen betrieben. Der aus Zerodur bestehende metrologische Rahmen und die Spiegelecke sind dadurch so ausdehnungsarm, dass Messabweichungen aufgrund von thermischer Expansion vernachlässigbar werden. Mit Hilfe von Umweltsensoren werden die klimatischen Einflussgrößen Lufttemperatur (ϑ), Luftdruck (p) und Wasserdampfpartialdruck (p_W) aufgezeichnet. Mit Hilfe der Edlén-Formel wird die Vakuumwellenlänge der Laserinterferometer auf die tatsächlich wirksame Wellenlänge in Luft korrigiert [18]. Das integrierte dynamische Regelungskonzept erlaubt Verfah- und Messgeschwindigkeiten von bis zu mehreren Millimetern pro Sekunde bei sehr geringen Positionierabweichungen [19–21]. *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen* erreichen über den gesamten Messbereich eine 3D-Messunsicherheit von $U_{3D} < 30 \text{ nm}$ [10]. Diese hohe Messpräzision kann auf den unkonventionellen Aufbau unter Einhaltung des Abbe'schen Komparatorprinzips in allen Messachsen zurückgeführt werden [22]. Das Prinzip besagt, dass die Messabweichung einer Strecke genau dann

Abbildung 1.1: Funktions- und Messprinzip der *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen* unter Verwendung des Fokussensors (siehe Kapitel 1.3.1). Die Probe wird, auf der Spiegelecke liegend, relativ zu den Messsystemen bewegt. Die laterale Bewegung wird initiiert, die axiale Bewegung sensorisch nachgeregelt (Z-Antrieb hier nicht dargestellt). Im Abbe-punkt schneiden sich sowohl die Probenoberfläche, die Sensorspitze, als auch die drei Interferometer zur Messung der Probenbewegung. Dadurch werden die Messabweichungen verringert.



minimal wird, wenn Messobjekt und Maßverkörperung zueinander fluchtend liegen [23]. In Abbildung 1.1 wird das Funktionsprinzip zur Einhaltung des Komparatorprinzips in allen Raumrichtungen der *NPMM* deutlich. Die bewegliche Spiegelecke, der so bezeichnete Probenstisch, wird durch Direktantriebe in den lateralen Raumrichtungen positioniert. Für die exakte Ausrichtung in z-Richtung wird die Spiegelecke von Tauschspulenantrieben in Bewegung versetzt [21]. Die Interferometer sind am metrologischen Rahmen befestigt und messen kontinuierlich die Position der Spiegelecke. Ihre Achsen schneiden sich virtuell im sogenannten Abbepunkt. Ebenfalls dort befindet sich die taktile Tastspitze bzw. der optische Fixpunkt (Nullpunkt) des Sensorsystems. Ein zu vermessendes Objekt wird auf der Spiegelecke so positioniert, dass die Oberfläche der Probe ebenfalls im Abbepunkt liegt. Der Sensor tastet die Oberfläche des Messobjektes an und wird auf einen bestimmten Arbeitspunkt kalibriert [24]. Während der lateralen Bewegung übergibt der Sensor dem z-Antrieb ein Korrektursignal, um vertikale Abweichungen zu kompensieren und die Probe in den Arbeitspunkt nachzuführen. Die eingestellte laterale und die nachgeregelterte vertikale Bewegung werden interferometrisch erfasst. So erhält man an jedem Messpunkt drei Koordinaten, die auf die Bewegung der Spiegelecke und so auch auf die Kontur der Probe rückführen. Dieses Messprinzip, bei der die Messinstrumente fix im Raum platziert werden und die Probe unter dem Sensor hinweg bewegt wird, wird als *sample scanning mode* bezeichnet [10].

1.3 Nanosensorik: Der Basissensor

In *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen* können eine Vielzahl von Sensoren eingesetzt werden. Dazu gehören neben taktilen Antastinstrumenten wie AFM und Tastschnittsensor, auch die optischen Weißlicht- und Fokussensoren. Das messtechnische Fundament all dieser Sensoren wird durch den sogenannten Basissensor bereitgestellt [25]. Dieser besteht im Wesentlichen aus einem Linsensystem und der Hologram Laser Unit [27]. Die Hologram Laser Unit, eine Kombination aus Laserdiode ($\lambda_{BS} = 650 \text{ nm}$), holografisch optischem Element und einer Photodiodenandordnung, ist eine Entwicklung aus der CD- und DVD-Technologie zum Auslesen von Daten entsprechender Speichermedien [28]. In Abbildung 1.2 sind Aufbau und Funktionsprinzip der Hologram Laser Unit verdeutlicht. Die Laserdiode der Einheit emittiert divergent austretendes Licht, welches durch eine Kollimatorlinse parallelisiert und anschließend durch eine Fokuslinse auf die Probe fokussiert wird. In das holografisch optische Element sind Gitter unterschiedlichen Gitterabstandes geätzt. Transmittiert der reflektierte Messstrahl das Hologramm,

wird er an den unterschiedlichen Gitterregionen gebeugt, aufgespalten und auf den Photoempfängern abgebildet. Einer der Beugungsstrahlen trifft auf das Segment 3 der Photodiodenanordnung. Dieses wird zur Sicherstellung der radialen Ausrichtung zum Lesen von CDs bzw. DVDs genutzt aber für die Anwendung als Abstandssensor nicht weiter benötigt. Liegt das Messobjekt exakt in der Fokalebene, trifft der zweite Beugungsstrahl genau auf den Übergang der Photodiodensegmente 1 und 2, sodass die Intensität auf den jeweiligen Segmenten gleich groß ist. Da das Hologramm wie eine Foucaultsche Schneide wirkt, ändert sich die Intensitätsverteilung auf beiden Segmenten sobald das Messobjekt defokussiert wird (siehe dazu Kap. 1.6.1.2). Ist das Messobjekt zu nah, belichtet der Beugungsstrahl einen größeren Teil des Photodiodensegments 1. Ist das Messobjekt zu fern, wird der Strahl primär auf Segment 2 abgebildet. Durch die Intensitätsverteilung auf den Photodiodensegmenten entstehen zwei elektrische Signale s_1 und s_2 , die zur Beschreibung des Fokussierungszustandes verwendet werden (vgl. Abb. 1.3) [26]. In der Messtechnik werden häufig Differenzsignale genutzt, um Aussagen zur relativen Bewegungsrichtung zwischen Messobjekt und Antastsystem treffen zu können [29]. Die beiden gaußförmigen Signale s_1 und s_2 haben zueinander einen Versatz entlang der optischen Achse. Im Differenzsignal $DIF = s_2 - s_1$ entsteht daher ein Nulldurchgang. Dieses Differenzsignal wird in der messtechnischen Anwendung auch als Fehlersignal verwendet, da es die Abweichung der Fokussierung innerhalb des linearen Bereiches, in Abhängigkeit eines Spannungssignals, eindeutig beschreibt. Zur Maschinenregelung in z-Richtung kann der Nulldurchgang des DIF als Regelgröße verwendet werden. In Kombination mit einem 16-Bit AD-Wandler können

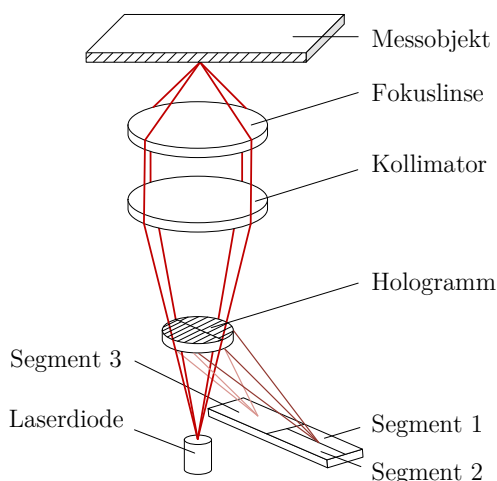


Abbildung 1.2: Vereinfachter schematischer Aufbau der Hologram Laser Unit (nach [26]).

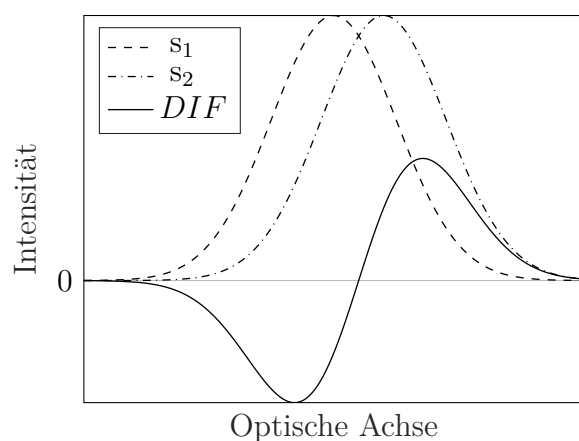


Abbildung 1.3: Differentielles Sensorsignal: Die Signale s_1 und s_2 besitzen einen Versatz entlang der optischen Messachse. Das Differenzsignal $DIF = s_2 - s_1$ wird als Regelsignal genutzt.

die analogen Intensitätssignale in diskrete Digitalwerte überführt werden, wodurch entlang der optischen Achse eine Auflösung im Nanometerbereich ermöglicht wird.

1.3.1 Erweiterungen des Basissensors

Der Basissensor bildet das messtechnische Fundament vieler anderen Nanosensoren der *NPMM*. Diese werden in optische und taktile Sensoren unterteilt. Optische Sensoren zeichnen sich durch ihr berührungsloses und dadurch zerstörungsfreies Messverfahren aus, bei denen hohe Messgeschwindigkeiten bis zu einigen Millimetern pro Sekunde erzielt werden können. Ein Nachteil der optischen Sensoren ist die vergleichsweise niedrige laterale Auflösung. Diese wird durch das Rayleigh-Kriterium K_R nach

$$K_R = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{NA} \quad (1.1)$$

begrenzt [30, 31]. Das Kriterium gibt an, welchen Abstand zwei ideale punktförmige Lichtquellen zueinander einnehmen müssen, um sie visuell noch voneinander unterscheiden zu können. Dieser Wert liegt bei sichtbarem Licht typischerweise in der Größenordnung mehrerer hundert Nanometer.

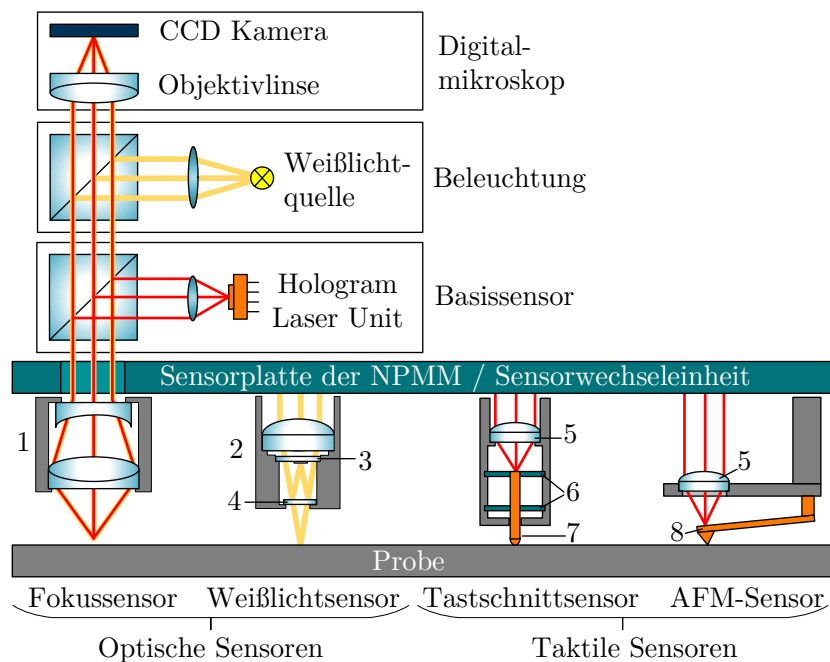
Um lateral eine höhere Auflösung bis in den Nanometerbereich zu erzielen, werden taktile Sensoren verwendet. Hier wird die Auflösung durch den Tastspitzenradius begrenzt. Mit Hilfe von AFM-Sensoren kann so eine laterale Auflösung von wenigen Nanometern erreicht werden [32, 33]. Da taktile Sensoren direkt über die Probenoberfläche geführt werden, messen diese mit nur sehr geringen Geschwindigkeiten v_m , um die Tastspitzen nicht zu beschädigen. Tabelle 1.1 gibt einen Überblick zu der axialen Auflösung R_{ax} , der lateralen Auflösung R_{lat} und der Messgeschwindigkeit v_m der einzelnen Sensortypen.

Tabelle 1.1: Messtechnische Eigenschaften der Nanosensoren [32].

	Fokus- sensor	Weißlicht- sensor	Tastschnitt- sensor	AFM- Sensor
Axiale Auflösung R_{ax}	1 nm	< 1 nm	1 nm	1 nm
Laterale Auflösung R_{lat}	0,6 μm	0,8 μm	4 μm	20 nm
Messgeschwin- digkeit v_m	$\leq 6 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	$> 20 \frac{\mu\text{m}}{\text{s}}$	100 $\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}$	10 $\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}$

Abbildung 1.4: Erweiterungen des Basissensors zu verschiedenen optischen und taktilen Nanosensoren (nach [32]):

- 1 LWD Objektiv
- 2 Mirau-Objektiv
- 3 Referenzspiegel
- 4 Strahlteiler
- 5 Fokuslinse
- 6 Doppelmembran
- 7 Taster
- 8 Cantilever



Eine Objektiv oder eine andere fokussierende Optik erweitert den Basissensor zum Fokussensor (vgl. Kap. 1.3). Um Kollisionen mit der Maschine zu vermeiden und die Handhabung sicherer zu gestalten, wird der Fokussensor typischerweise mit einem Long-Working-Distance (LWD) Mikroskopobjektiv betrieben. Liegen die Arbeitsabstände (engl.: working distance (wd)) von Standardobjektiven mit einer numerischen Apertur (NA) von $NA = 0,6$ und einer Vergrößerung von $\Gamma = 100\times$ typischerweise bei unter 1 mm, erreichen LWD Objektive dieser Spezifikation Arbeitsabstände von über 10 mm.

In Abbildung 1.4 werden auch die anderen Sensortypen und ihre Funktionsweisen schematisch dargestellt. Der Weißlichtsensor ist eine Kombination des Basissensors mit einem Mirau-Objektiv [32]. Ein Mirau-Objektiv ist ein spezielles Interferenzobjektiv, in welchem ein halbdurchlässiger Spiegel zur Aufteilung des Strahls sitzt. Der Referenzstrahl wird an diesem halbdurchlässigen Spiegel reflektiert und auf einem Referenzspiegel abgebildet. Der Messstrahl passiert den Strahlteiler und wird auf der Probenoberfläche fokussiert. Aufgrund der bildseitigen Überlagerung beider Strahlen entstehen Weißlichtinterferenzen [34]. Durch Scans entlang der z-Achse werden Interferogramme in verschiedenen Ebenen mit einer CCD-Kamera aufgenommen [35]. Indem mit jedem Pixel das Interferogramm aufgenommen und ausgewertet wird, können so konkrete Höheninformationen aus den Daten berechnet werden. Aufgrund der limitierten Bildrate sind mit diesem Sensor zwar nur geringe Messgeschwindigkeiten möglich - jedoch wird auch direkt ein ganzer Bildausschnitt von $0,8\text{ mm} \times 0,6\text{ mm}$ aufgenommen, für dessen Scan ein Punktsensor mehr als 30 Minuten benötigen würde.

Die Messspitze des Tastschnittsensors besteht aus einer Mikrokugel mit einem Radius von $r_{TS} = 2 \mu\text{m}$. Eine Doppelmembrananordnung dient als Parallelführung des Tasters. Der Basissensor registriert die axiale Auslenkung des Tasters während einer Messung und ermöglicht eine Nachregelung der vertikalen Positionierung. So kann auch der Tastschnittsensor als Nullpunktsensorausführung in *NPMM* genutzt werden [32]. Der Sensor kann aufgrund seiner relativ hohen taktilen Messgeschwindigkeit auch als Referenzmesssystem für optische Messungen verwendet werden. Dies ist besonders dann vorteilhaft, wenn bei optischen Sensoren unter besonderen Messbedingungen erhöhte Messabweichungen auftreten.

Der AFM-Sensor ähnelt in seiner Funktionsweise dem Tastschnittsensor. Da die Messgeschwindigkeiten dieses Sensors sehr gering sind, wird das AFM nur für besondere Messaufgaben genutzt. Der Sensor eignet sich aufgrund seines extrem geringeren Tastspitzenradius ($r_{AFM} = 2 - 20 \text{ nm}$) vor allem dort, wo eine laterale Auflösung unterhalb der optischen Beugungsbegrenzung erreicht werden muss [36].

1.3.2 Funktionstechnische Nachteile des Basissensors

Optische Oberflächen- und Profilsensoren weisen in der Regel eine gewisse Radialsymmetrie auf, um unabhängig der Messrichtung zuverlässige und vergleichbare Ergebnisse zu liefern. Die ursprüngliche Anwendung der Hologram-Laser-Unit beschränkte sich auf die Messung der immer gleichen Richtung - der Drehbewegungsrichtung einer CD oder DVD. Das Funktionsprinzip der Unit beruht auf dem Fokusedetektionsprinzip einer Foucaultschen Schneide (vgl. Kap. 1.6.1.2). Aufgrund dieses Aufbaus kommt es zu einer sensorischen Vorzugsrichtung in x-Richtung. Der Sensor kann zwar ebenfalls in y-Richtung messen, jedoch prägen sich dort verstärkte Messabweichungen aus. Diese entstehen beispielsweise bei der Messung einer gekrümmten oder unebenen Probe, Linse oder Asphäre. In der Vorzugsrichtung können aufgrund der richtungsabhängigen Funktionsweise deutlich größere Oberflächenwinkel erfasst werden als in der Nebenrichtung. Die Richtungsabhängigkeit des Basissensors führt daher zu großen Problemen bei der Ausweitung möglicher Anwendungen auf gekrümmte Oberflächen.

Aufgrund des immer weiter sinkenden Gebrauchs von CD- und DVD-Laufwerken, wurde die Produktion der Hologram-Laser-Unit deutlich verringert. Da diese nicht mehr einzeln erwerbbar sind, ist die Verfügbarkeit dieser Unit limitiert. Die Verwendbarkeit des Fokussensors ist somit zeitlich begrenzt und von der Produktion der Einheit abhängig.

Darüber hinaus ist das optische Design der Hologram Laser Unit aufeinander so abgestimmt, dass die beste Signalqualität mit einer numerischen Apertur von $NA = 0,6$ erreicht wird [28, 31]. Versuche haben gezeigt, dass der Basissensor nur in einem Bereich von $0,55 < NA < 0,65$ nutzbare Signale liefert. Die Erhöhung des lateralen Auflösungsvermögens des Sensors nach Formel 1.1 ist dementsprechend nur sehr eingeschränkt möglich, wodurch der Basissensor schnell an seine technischen und technologischen Grenzen stößt.

In der kompakten Basissensoreinheit sind alle signalgebenden optoelektronischen Komponenten enthalten. Diese erzeugen während des Betriebs einen Temperaturgradienten nahe der zu vermessenden Probenoberfläche. Hochpräzise Messungen im nanoskaligen Bereich erfordern kontrollierte Umweltbedingungen. Besonders Temperatureinflüsse führen zu erschwerten Messbedingungen und erhöhten Messabweichungen.

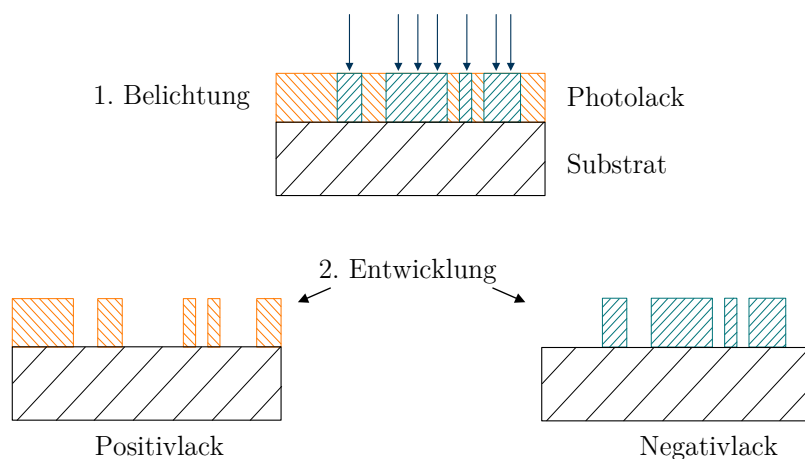
1.4 Nanofabrikation - Grundlagen und Anwendungen

Neben dem präzisen Positionieren und Messen, kann der Anwendungsbereich der *NPM* erweitert werden. Der große adressierbare Arbeitsbereich, die hohen Verfahrensgeschwindigkeiten, sowie die exakte Positionierung eröffnen das Potential hochauflösender Fabrikationsanwendungen. Das Graduiertenkolleg „Spitzen- und laserbasierte 3D-Nanofabrikation in ausgedehnten makroskopischen Arbeitsbereichen“ (NanoFab) beschäftigt sich unter anderem mit Lithografieprozessen, die zur Integration in *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen* vorgesehen werden. Lithografie beschreibt eine Gruppe von Verfahren, bei der durch chemische oder physikalische Prozesse definierte Strukturen in oder auf einem Substrat erzeugt werden. Der Ursprung der Lithografie geht auf den Musiker Alois Senefelder im Jahr 1799 zurück. Senefelder suchte nach einem Verfahren zur Replizierung von Notenblättern und fand die Lösung in einem chemischen Verfahren, bei dem er mit fetthaltiger Tinte einen Kalkstein beschrieb und diesen anschließend mit einer ätzenden Lösung behandelte [37]. Bereits damals galt diese Erfindung als große Innovation mit noch größerem Potential zur Übertragung und Vervielfältigung von Druckerzeugnissen. Im Laufe der Jahre entwickelte sich aus Senefelders Grundidee das bis heute führende Verfahren zur Erstellung und Replikation von Nanostrukturen für die Halbleiterindustrie. Inzwischen werden lithografische Verfahren aber auch im 3D-Druck (Stereolithografie), beispielsweise in der Medizintechnik, im Automobilbau oder auch in der Architektur eingesetzt [38]. Durch die immer weiter sinkenden Kosten, sind 3D-Drucker inzwischen auch in privaten Haushalten häufig zu finden.

In der Lithografie wird zwischen maskenlosen und replizierenden Verfahren unterschieden. Dabei kommt den maskenlosen Verfahren in der Nanotechnologie eine besondere Rolle zu [39]. Für replizierende Verfahren wird zuerst ein maskenlos hergestellter Master benötigt, dessen Strukturen dann entweder direkt vervielfältigt werden, oder dessen Strukturen als Maske für großflächige Belichtungsverfahren dienen. Für maskenlose oder direktschreibende Anwendungen werden fokussierte Elektronen-, Ionen- oder auch Laserstrahlen genutzt, die eine im Brennpunkt liegende Resistschicht belichten. Die Durchmesser der fokussierten Strahlen können, je nach Wellenlänge, wenige Nanometer betragen. Nach der Entwicklung des beschriebenen Lackes bleiben die belichteten Strukturen erhalten (Negativresist) oder ebendiese werden ausgewaschen und nur der unbelichtete Teil des Lackes bleibt bestehen (Positivresist) [40]. Abbildung 1.5 verdeutlicht die unterschiedlichen Eigenschaften der zwei Lackarten am Beispiel der Photolithografie.

Zu den maskenlosen Verfahren gehört unter anderem die Feldemissions-Rastersondenlithografie (engl.: Field-Emission Scanning Probe Lithography (FE-SPL)), bei der mit fokussierten Elektronen Strukturbreiten von sub-10 nm erreicht werden können [33]. Optische Verfahren, wie das direkte Laserschreiben (engl.: Direct Laser Writing (DLW)) ermöglichen, durch ultrakurze Laserpulse im Femtosekundenbereich, Strukturen unter 100 nm Breite. Innerhalb des Graduiertenkollegs NanoFab werden Feldemissions-Rastersondenlithographie, interferenzoptische und holografische Lithografie, Soft-Nanoprägelithografie, sowie Ein-Photonen- und Mehr-Mohotonen-Polimerisationsprozesse zum direkten Laserschreiben auf ihre Anwendbarkeit in *NPMM* geprüft und umgesetzt. Ziel des Projektes ist heutige Strukturierungstechnologien zu nutzen und mit Hilfe der *NPMM* auf große Arbeitsbereiche zu übertragen. Dabei wird die hohe Präzision der *NPMM* ausgenutzt, um die Strukturen mit verbesserter Geradheit, geringerer Kantenrauheit und exakter Ausrichtung auf das Trägermaterial zu bringen und die

Abbildung 1.5: Photolithografie mit Positiv- und Negativresist: Im ersten Schritt wird der Photoresist belichtet. Die belichteten Bereiche (türkis) werden bei Positivlacken nach der Entwicklung ausgewaschen. Bei Negativlacken bleiben einzig diese Bereiche erhalten (nach [40]).



Packungsdichte zu erhöhen [41]. Die Packungsdichte ist ein Maß für die Anzahl von nebeneinanderliegender Strukturen auf einer Fläche. Mit der Erhöhung der Packungsdichte kann ein Beitrag zur Einhaltung von *Moore's Gesetz* geleistet werden.

1.4.1 Mooresches Gesetz

Gordon Earle Moore, Mitbegründer der Firma *Intel*, veröffentlichte im Jahr 1965 im Fachmagazin *Electronics* einen Artikel über die vergangene und zukünftige Entwicklung integrierter Schaltkreise. Er prognostizierte die Verdoppelung der Bauteile integrierter Schaltungen für ein jedes Jahr der kommenden Dekade [43]. Nachdem sich seine Prognose in neun der folgenden zehn Jahre bewahrheitete, bekam seine Vorhersage den Namen *Moore's Law* [deutsch: Moore's Gesetz]. Später wurde sein Gesetz folgendermaßen abgeändert: „[...] the complexity was doubling every two years and the transistors were getting faster, that computer performance was going to double every 18 months” [44]. In Abbildung 1.6 ist das Wachstum der Transistorenanzahl über den zeitlichen Verlauf nach [42] zu sehen. Wie *Gordon Moore* vorhergesagt hat, kann man von einer zeitlich regelmäßigen Verdoppelung der Transistorenanzahl bis in die heutige Zeit sprechen. Die im Jahr 2016 erschienene *International Technology Roadmap for Semiconductors* erwartet für das Jahr 2021 jedoch eine wirtschaftliche Grenze zur weiteren Einhaltung des Moore'schen Gesetzes. Einhergehend mit der steigenden Anzahl der Bauteile eines

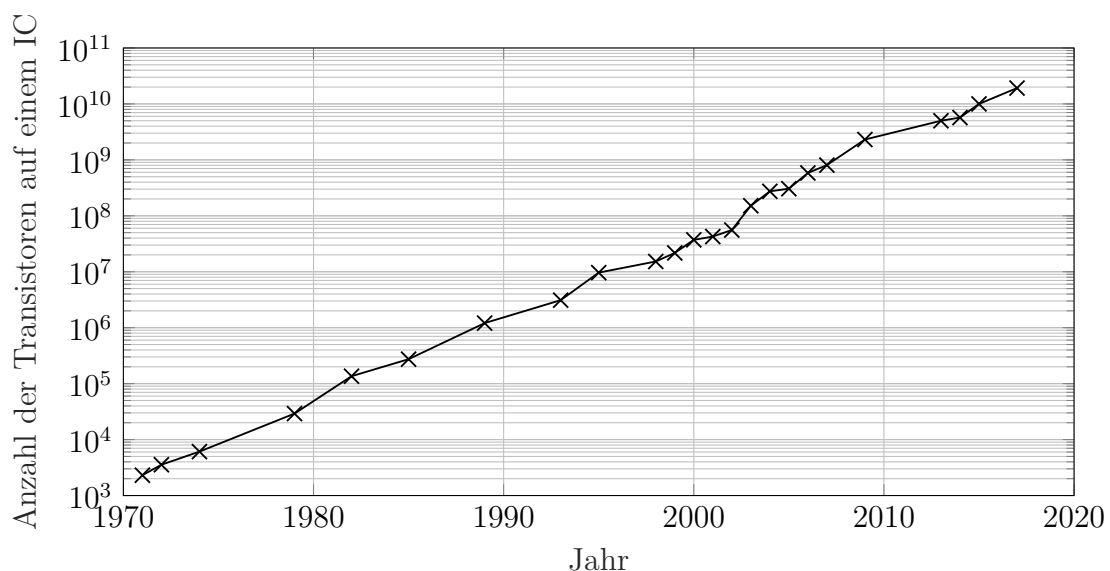


Abbildung 1.6: Wachstum der Bauteilanzahl integrierter Schaltungen von 1971 bis 2017: Die Anzahl der Transistoren verdoppelt sich in regelmäßigen Abständen und bestätigt das Mooresche Gesetz (nach [42]).

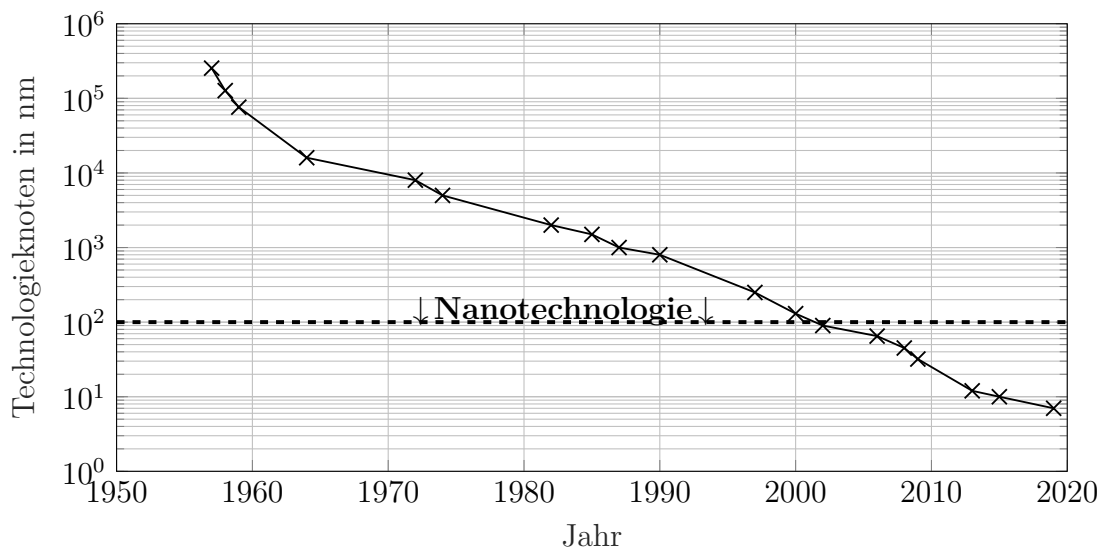


Abbildung 1.7: Entwicklung der Technologieknoten von 1957 bis 2019: Meilensteine aus der lithografischen Fertigungstechnik werden als Technologieknoten bezeichnet. Ein Technologieknoten gibt die minimal erzeugbare Strukturgröße (critical dimension) mit Hilfe der verwendeten Lithografiertechnik an (entsprechend [46–48]).

ICs bedeutet das für die Strukturgrößen dieser Bauteile, dass diese immer kleiner und schmaler dimensioniert werden müssen. Die Bereitstellung eines neuen strukturverringenden Verfahrens wird in der Halbleitertechnik als Technologieknoten bezeichnet und gibt die kleinstmögliche Fertigungsgröße mit dieser Technik an. Im Jahr 2018 hat *Samsung* den 7 nm-Technologieknoten mit Hilfe der EUV-Lithografie erschlossen, bei der mit extrem kurzwelliger Strahlung Strukturen erzeugt werden [45]. Abbildung 1.7 zeigt die Entwicklung der Technologieknoten seit 1957. Etwa seit dem Jahr 2000 befindet man sich im Bereich der 100 nm-Strukturierung. In diesem Bereich spricht man von Nanotechnologie [46].

1.4.2 Direct Laser Writing

Das direkte Laserschreiben gehört zu den maskenlosen photolithografischen Techniken basierend auf Photopolymerisationsprozessen. Die Photopolymerisation ist ein Verfahren, welches „durch sichtbares oder ultraviolettes Licht initiiert wird, typischerweise in Gegenwart einer lichtempfindlichen Verbindung, eines Photoinitiators“ [49]. Photoinitiatoren werden in speziell entwickelten Photolacken (Resisten) eingesetzt. Negativlacke werden während der Belichtung von einem Monomer in ein Polymer überführt (vgl. auch Abb. 1.5). Dabei sorgt der Initiator für eine Kettenreaktion innerhalb der Monomere, was zu einer Vernetzung und einer photochemischen Härtung führt [50]. Positivlacke

sind bereits Polymere. Der Photoinitiator sorgt innerhalb des Lackes zu einem Bindungsbruch des Polymers während der Belichtung (Depolymerisation) [51]. Dadurch ändert der Lack seine Struktur und wird löslich. Nach der Belichtung werden die Resiste entwickelt. Dabei werden die löslichen Bereiche ausgewaschen - die geschriebenen Strukturen bleiben stehen. Direct Laser Writing kann in zwei Prozessarten unterteilt werden: Die ursprüngliche Variante dieser Lithografie beruht auf der Ein-Photon-Polymerisation (1PP). Hier besitzen die einzelnen Photonen der verwendeten Lichtwellenlänge genügend Energie, um die Photolackinitiatoren direkt auszulösen. Bei 1PP-Anwendungen polymerisiert der gesamte belichtete Bereich des Lackes. Der Energieeintrag wird über das Plancksche Wirkungsquantum h nach der Formel

$$E = h \cdot \nu \quad (1.2)$$

beschrieben. Dabei gibt ν die Schwingungsfrequenz der Wellenlänge λ über die Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 mit

$$\nu = \frac{c_0}{\lambda} \quad (1.3)$$

an. Die zweite Form ist die Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP). Hier werden für einen entsprechenden Übergang zum angeregten Zustand zwei Photonen benötigt. Diese besitzen jeweils die halbe Energie und die doppelte Wellenlänge, welche für einen entsprechenden Einphotonenübergang nötig ist [52]. Durch die Verwendung eines hochfrequent gepulsten Lasers, typischerweise eines fs-Laser, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass quasi zeitgleich zwei Photonen absorbiert werden. Bei der Absorption des ersten Photons wird ein virtuelles energetisches Zwischenniveau geschaffen, welches den Übergang zum angeregten Zustand ermöglicht. Dieses Zwischenniveau überdauert jedoch typischerweise nur ein Zeitintervall von 10^{-15} s [53]. Wird innerhalb dieser Zeit ein zweites Photon absorbiert, kommt es zur Polymerisation. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein solcher Zustand erreicht wird, steigt mit dem Quadrat der Lichtintensität [52]. Der Energieeintrag bei 2PP-Prozessen wird aus der Summe der Einzelenergieeinträge beider Photonen mit

$$E = h \cdot \nu_1 + h \cdot \nu_2 \quad (1.4)$$

beschrieben. Der energetische Unterschied zur Erzielung des angeregten Zustandes zwischen 1PP- und 2PP-Prozessen ist in Abbildung 1.8 dargestellt.

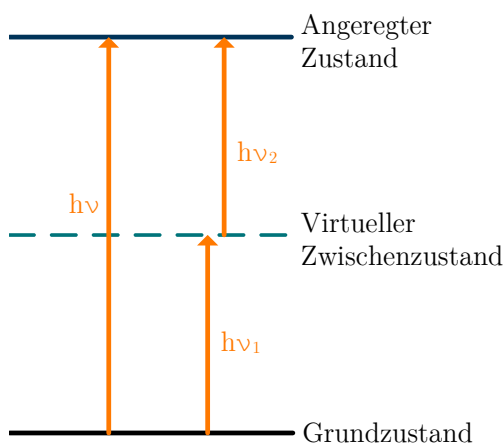


Abbildung 1.8: Schematische Darstellung der energetischen Zustände.
links: 1PP, **rechts:** 2PP (nach [54]).

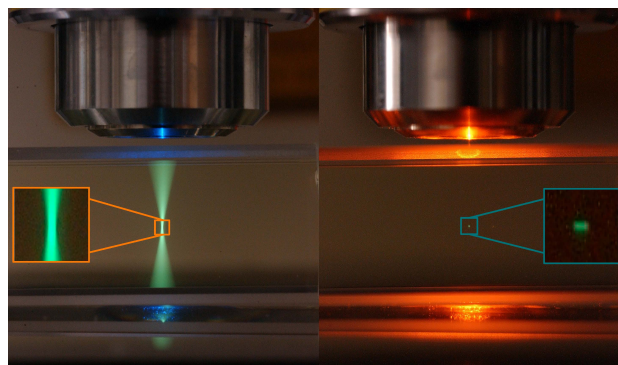


Abbildung 1.9: Polymerisationsbereiche bei der DLW-Methode sichtbar gemacht in einer Fluoreszenz-Lösung. **links:** 1PP bei $\lambda = 488 \text{ nm}$. **rechts:** 2PP durch gepulsten Infrarotlaser. (Steve Ruzin & Holly Aaron, UC Berkeley [55])

Photolacke werden in der Regel durch Spin- oder Spray-Coating aufgetragen [56]. Dadurch können sehr dünne Schichtdicken $t_R < 1 \mu\text{m}$ erzielt werden. Für 1PP DLW-Anwendungen sind dünne Resistschichten von Vorteil, da der Lack überall innerhalb des fokussierten Strahls polymerisiert. Um möglichst schmale Strukturen zu erzeugen, wird der fokussierte Laserstrahl daher in der Regel nur innerhalb seiner Schärfentiefe durch den Resist geführt. Dickere Resistschichten führen zu einer Polymerisation außerhalb der Tiefenschärfe und somit zu verbreiterten Strukturen (vgl. Abb. 1.9). Innerhalb der Tiefenschärfe sind die minimalen Strukturbreiten (critical dimension (CD)) wieder durch die Annahme des Rayleigh-Kriteriums begrenzt [57]. Die Halbleiterindustrie verwendet dafür eine leicht abgeänderte Form, bei der sich ein Faktor k_1 aus den Ergebnissen der Strukturierung ergibt:

$$CD = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA} \quad (1.5)$$

Dieser Technologiefaktor k_1 beschreibt im Wesentlichen die Güte eines Lithografieprozesses und dient als Vergleichswert in der Halbleitertechnik. Die numerische Apertur ist ein Maß für den halben Öffnungswinkel der Austrittspupille der fokussierenden Optik und wird einheitenlos mit

$$NA = n \cdot \sin(\alpha) \quad (1.6)$$

angegeben (n - Brechzahl; α - halber Öffnungswinkel des Objektivs). Zur Reduktion der critical dimensions werden möglichst kurzwellige Prozesslaser verwendet. Die numerische

Apertur der Sammeloptiken kann durch spezielle Immersionsöle bis auf einen Wert von etwa $NA \lesssim 1,5$ gesteigert werden, erreicht aber in dieser Größenordnung seine technologische Grenze. Der lithografische Technologiefaktor liegt typischerweise zwischen $0,25 \leq k_1 \leq 1$ [58]. Kommerziell erhältliche Geräte mit einer numerischen Apertur von $NA = 0,85$, die beispielsweise bei einer Wellenlänge von $\lambda = 405 \text{ nm}$ arbeiten, erreichen critical dimensions von $CD \approx 300 \text{ nm}$ (vgl. *4PICO: PicoMaster 200 Direct Laser Writer* oder *Heidelberg Instruments: DWL 66+*). Der Technologiefaktor dieser Geräte liegt nach Formel 1.5 dementsprechend bei

$$k_1 = CD \cdot \frac{NA}{\lambda} = 300 \text{ nm} \cdot \frac{0,85}{405 \text{ nm}} = 0,63. \quad (1.7)$$

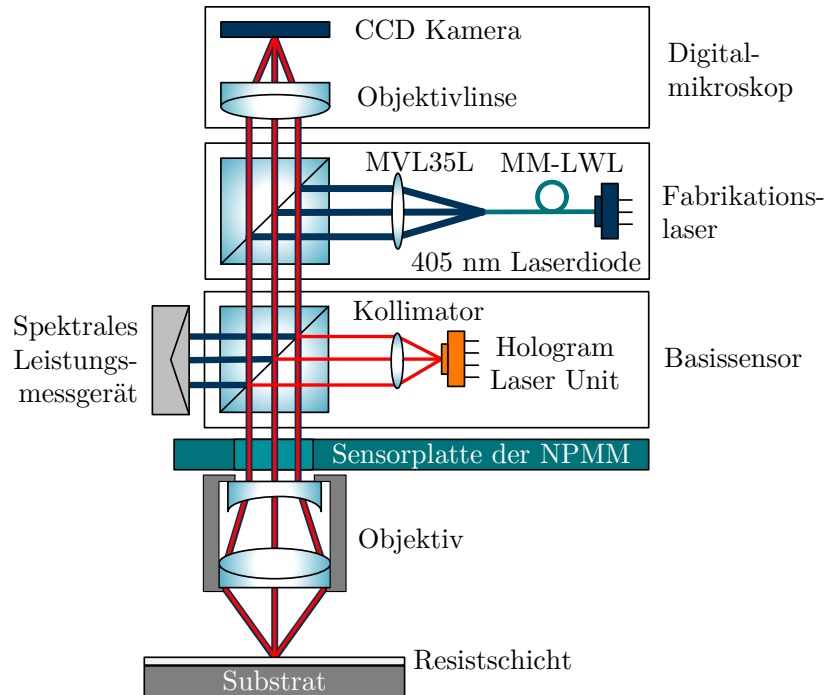
1.5 Ein-Photon-Polymerisation auf Basis der NPMM

Im Jahr 2013 wurden bereits Grundlagenuntersuchungen zur Strukturierung von Materialien mittels Ein-Photon-Polymerisations-Prozessen in *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen* geführt. Damals lag der Fokus vorrangig in der generellen Anwendbarkeit dieser Technik innerhalb der NPMM. Diese Vorarbeiten führten im Weiteren aber auch zur Diagnostizierung einiger technischer Probleme und Herausforderungen.

1.5.1 Vorarbeiten und Funktionsnachweis

Für die Integration der Lithografiertechnik wurde eine Laserdiode mit einer Wellenlänge von $\lambda_P = 405 \text{ nm}$ genutzt ($P = 1 \text{ W}$) [59]. Um einen unnötigen Wärmeeintrag innerhalb des Messbereichs der NPMM zu vermeiden, wurde die Laserdiode in einen Lichtwellenleiter (LWL) eingekoppelt. Aufgrund der erfahrungsgemäß recht schwierigen und aufwendigen Einkopplung dieser kurzen Wellenlänge in eine Singlemodefaser (SM-LWL), bei der kleinste Temperaturschwankungen bereits zum Einbruch der Einkopplung und der Laserleistung führen können, wurde für die Erstinbetriebnahme eine Multimodefaser (MM-LWL) mit dem Kerndurchmesser $d_K = 62,5 \mu\text{m}$ genutzt. Anstelle der sonst üblichen Kamerabeleuchtung wird hier der Fabrikationslaser über einen Strahlteilerwürfel in den optischen Strahlengang eingebracht (siehe Abb. 1.10 und vgl. Abb. 1.4). Zur Kollimation des aus der Strukturierungsfaser emmittierten Lichts, wird ein Kameraobjektiv (*Tamron MVL35L*) mit einer Brennweite von $f_{Koll} = 35 \text{ mm}$ verwendet. Die Fabrikationslaser kann durch Spannungsmodulation ein- und ausgeschaltet werden und auf eine konkrete Ausgangsleistung eingestellt werden. Die Ausgangsleis-

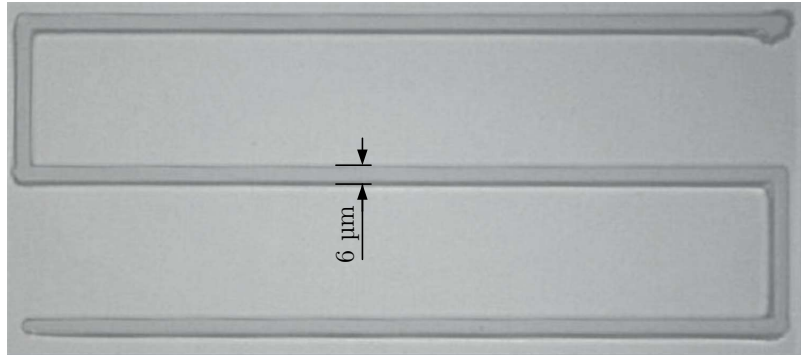
Abbildung 1.10: Erweiterung des Fokussensors um einen Fabrikationslaser zur Integration von 1PP-Lithografieprozessen in *NPMM* (vgl. auch Abbildung 1.4). Durch die Kombination aus Mess- und Strukturierungssystem können Proben mit einer Photoresistbeschichtung in *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen* sensorisch angetastet und lithografisch strukturiert werden. Dadurch wird der Anwendungsbereich von *NPMM* um Fabrikationsprozesse erweitert.



tung wird in-situ durch ein spektrales Leistungsmessgerät vor dem Objektivtritt mitgemessen. Der Negativresist *AZ ECI 3007* der Firma *MircoChemicals* dient als Photolack und wird durch Spin-Coating mit einer Schichtdicke von $t_R = 700 \text{ nm}$ auf einem Glassubstrat aufgetragen. Die Oberflächen- bzw. Resistantastung innerhalb der *NPMM* geschieht durch den Fokussensor. Dieser regelt die z-Positionierung der *NPMM* nach und hält den relativen Abstand zwischen Photolack und Austrittspupille des Objektivs jederzeit gleich. Der Fokussensor arbeitet mit einer Wellenlänge von $\lambda_{BS} = 650 \text{ nm}$ und wird mit einem *Nikon*-Objektiv der numerischen Apertur $NA = 0,65$ und einer Brennweite $f_{Obj} = 4 \text{ mm}$ verwendet (siehe Kapitel 1.3.1) [28]. Da der Lack nur für den Wellenlängenbereich von ca. $320 \text{ nm} - 440 \text{ nm}$ empfindlich ist, wird noch kein Polymerisationsprozess durch die Antastung ausgelöst [60]. Nachdem der Resist sensorisch erfasst wurde, kann eine laterale Probenbewegung initiiert, der Fabrikationslaser eingeschaltet und der Direct Laser Writing-Prozess gestartet werden. Die Belichtungsdosis, die für die Durchstrukturierung des Lackes angegeben ist, beträgt $D_{ECI} = 140 \text{ mJ/cm}^2 \hat{=} 1400 \text{ Ws/m}^2$ [60]. In Abbildung 1.11 ist die erste durch DLW in *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen* erzeugte Struktur in einem Photolack zu sehen. Die Mäanderstruktur wurde mit einer Geschwindigkeit $v_s = 10 \mu\text{m/s}$ und einer Laserleistung von $P = 1,6 \mu\text{W}$ erzeugt. Die Strukturbreite beträgt ungefähr $6 \mu\text{m}$. Die Bildgröße B des Faserkerndurchmessers (Gegenstandsgröße $G = d_K = 62,5 \mu\text{m}$) auf dem Resist sollte in der Größenordnung der entstehenden Strukturbreite liegen. Unter

Abbildung 1.11: Durch 1PP-Direct Laser Writing in Nanopositionier- und Nanomeßmaschinen erzeugte Mäanderstruktur [59].

Resist: AZ ECI 3007,
 $t_R = 700 \text{ nm}$,
 $v_s = 10 \text{ } \mu\text{m/s}$,
 $P = 1,6 \text{ } \mu\text{W}$



der Annahme eines vereinfachten Zwei-Linsen-Systems, bestehend aus Kollimator und Objektiv, kann die Bildgröße durch die Abbildungsgleichung beschrieben werden [61]:

$$B = \frac{G \cdot f_{Obj}}{f_{Koll}} = \frac{62,5 \text{ } \mu\text{m} \cdot 4 \text{ mm}}{35 \text{ mm}} = 7,1 \text{ } \mu\text{m} \quad (1.8)$$

Die Strukturbreite liegt demnach in der erwarteten Größenordnung. Die Erzeugung der Struktur bestätigt die Machbarkeit der Anwendung in NPMM.

1.5.2 Einfluss der Belichtungsdosis

Einen wesentlichen Einfluss auf die lithografisch erzeugte Strukturgröße hat die Belichtungsdosis D . Eine zu hohe Belichtungsdosis führt dazu, dass zusätzlich die Bereiche im Resist polymerisieren, die im Streubereich des Spots liegen. „Von Streuung spricht man, wenn eine einfallende Strahlungswelle durch die Wechselwirkung mit einem Molekül von seiner ursprünglichen Richtung in eine andere umgelenkt (gestreut) wird“ [62]. Für die Resiste werden von den Herstellern Empfehlungen zur idealen Strukturierungsdosis gegeben.

Mit einem veränderten Setup werden, aufbauend auf den folgenden theoretischen Betrachtungen zur Belichtungsdosis, Strukturierungsversuche mit variierenden Verfahrensgeschwindigkeiten durchgeführt. So können die erzeugten critical dimensions in Abhängigkeit der Belichtungsdosis genauer betrachtet werden. Für die Untersuchung wird ein neuer Photoresist genutzt, bei dem die Vorbehandlung, Auftragung und Entwicklung deutlich vereinfacht ist (*MicroChemicals: AZ 1505*). Außerdem wird ein Diodenlaser des Typs *51nanoL-S* der Firma *Schäfter + Kirchhoff* (SuK) verwendet. Dieser ist bereits mit einem SM-LWL gekoppelt [63]. Der Laser ist durch analoge Spannungsmodulation in einem Bereich zwischen $P_{min} < P < P_{max}$ einstellbar. Die Lichtquelle steht in zweifacher Ausführung, mit maximalen Laserleistungen am Faseren-

de von $P_{max} = 1 \text{ mW}$ bzw. $P_{max} = 5 \text{ mW}$, zur Verfügung. Der Faserkerndurchmesser des Strukturierungslasers beträgt $d_K = G = 2,8 \text{ }\mu\text{m}$. Zur Kollimation wird eine Linse mit der Brennweite $f_{Koll} = 18,15 \text{ mm}$ verwendet (*reichelt elektronik: LAS LEN 183*). Die Fokussierung des Lasers geschieht durch ein *Nikon*-Objektiv (*Nikon CFI60 TU Plan Epi ELWD 50x*) der Brennweite $f_{Obj} = 4 \text{ mm}$.

Mit diesen Angaben wird nun eine theoretische Betrachtung für die Belichtungsdosis geführt. Auf diese Betrachtungen wird im späteren Verlauf der Arbeit zurückgegriffen werden. Die Belichtungsdosis gibt den Energieeintrag E pro Flächenelement A an. Dieses gleicht im Idealfall der Fläche des projizierten Bildes. Nach Formel 1.8 beträgt die Bildgröße des Faserkerns

$$B = \frac{G \cdot f_{Obj}}{f_{Koll}} = \frac{2,8 \text{ }\mu\text{m} \cdot 4 \text{ mm}}{18,15 \text{ mm}} = 0,62 \text{ }\mu\text{m}. \quad (1.9)$$

Unter der Annahme einer abgebildeten Kreisfläche ergibt sich für das Flächenelement

$$A = \pi \cdot \left(\frac{B}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{0,62 \text{ }\mu\text{m}}{2}\right)^2 = 0,3 \text{ }\mu\text{m}^2. \quad (1.10)$$

Zur weiteren Berechnung des Energieeintrags wird die Belichtungszeit t dieses Flächenelements benötigt. Die Belichtungszeit wird über die eingestellte Verfahrensgeschwindigkeit v berechnet und entspricht der Zeit, die ein infinitesimaler Punkt des Resists dem abgebildeten Spot ausgesetzt ist.

$$t = \frac{B}{v} = \frac{0,62 \text{ }\mu\text{m}}{v} \quad (1.11)$$

Die Belichtungszeit wird mit der eingestellten Laserleistung multipliziert und ergibt nach Formel 1.12 den Energieeintrag des Lasers in den Photolack:

$$E = P \cdot t = P \cdot \frac{0,62 \text{ }\mu\text{m}}{v} \quad (1.12)$$

Zur Berechnung der Belichtungsdosis wird im letzten Schritt das Verhältnis von Energieeintrag E und belichteter Fläche A gebildet:

$$D = \frac{E}{A} = \frac{P \cdot \frac{0,62 \text{ }\mu\text{m}}{v}}{0,3 \text{ }\mu\text{m}^2} \quad (1.13)$$

Auf Basis dieses Zusammenhangs werden die zuvor genannten Strukturierungsversuche durchgeführt. Die empfohlene Belichtungsdosis für die Durchstrukturierung des

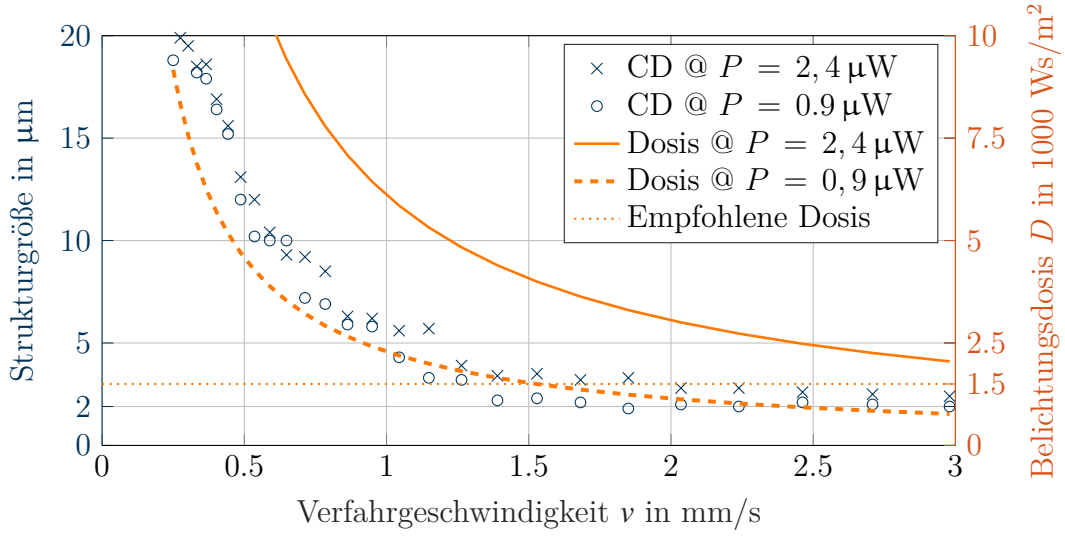


Abbildung 1.12: Dosisuntersuchungen durch Geschwindigkeitsänderungen bei $P = 2,4 \mu\text{W}$ und $P = 0,9 \mu\text{W}$. Die Strukturgrößen wurden mit einem AFM-Sensor gemessen. Die Dosis ist nach Formel 1.13 in Abhängigkeit der Laserleistung und Geschwindigkeit berechnet. Die empfohlene Dosis beträgt $D_{AZ} = 1500 \text{ Ws/m}^2$.

Resists beträgt $D_{AZ} = 1500 \text{ Ws/m}^2$ bei $\lambda_P = 405 \text{ nm}$. Dieser Wert wird als Referenz herangezogen, anhand derer zwei Versuchsreihen ausgelegt werden. Im ersten Versuch wird die Referenzdosis bei einer Laserleistung von $P = 2,4 \mu\text{W}$ und einer Geschwindigkeitsvariation von $0,25 \text{ mm/s} \leq v \leq 3 \text{ mm/s}$ dauerhaft überschritten. Im zweiten Versuch wird die Referenzdosis bei einer Laserleistung von $P = 0,9 \mu\text{W}$ ab einer Geschwindigkeit von etwa $1,5 \text{ mm/s}$ unterschritten. Die erzeugten Strukturen werden mit dem AFM-Sensor vermessen, um so den Zusammenhang zwischen Belichtungsdosis und critical dimension präzise auszuarbeiten. In Abbildung 1.12 sind die erzeugten Strukturgrößen über die Änderung der Verfahrensgeschwindigkeit aufgetragen. An einer weiteren Achse kann die berechnete Belichtungsdosis nach Formel 1.13 abgelesen werden. Auffallend ist, dass auch bei Unterschreiten der empfohlenen Dosis die Strukturbreiten nicht kleiner als $\approx 2 \mu\text{m}$ werden und somit wesentlich größer sind als die durch die geometrische Optik berechnete Bildgröße $B = 0,62 \mu\text{m}$.

Ein Grund für die Diskrepanz zwischen Abbildungsgröße und tatsächlich erzeugter Strukturgröße ist möglicherweise auf die chromatische Aberration, genauer den Farbblänsfehler des Objektivs, zurückzuführen. Die chromatische Aberration führt dazu, dass die Fokuspunkte der unterschiedlichen Wellenlängen nicht in der selben Ebene liegen und es dadurch zu einem Versatz zwischen der Mess- und der Lithografieebene kommt [64]. Der Abstand zwischen den Fokalebenen wird Schnittweitendifferenz Δ_{sw} genannt und ist auf den physikalischen Effekt der Dispersion zurückzuführen [66]. Die Brechzahl

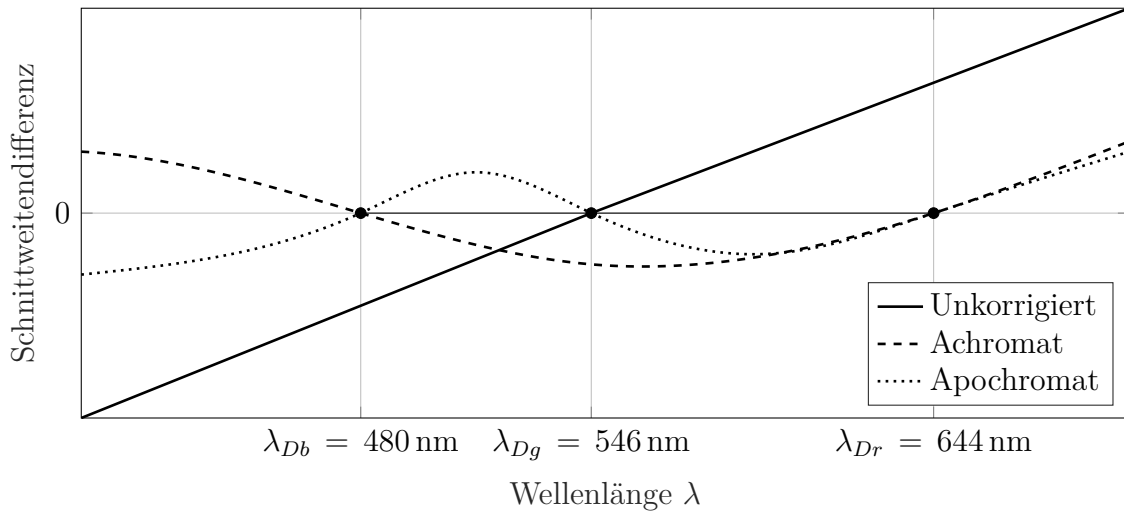


Abbildung 1.13: Qualitative Farbkorrektur der Designwellenlängen (nach [65]): Die Brennweite unkorrigierter Objektive wird auf die Designwellenlänge der gelb-grünen Farbe bei $\lambda_{Dg} = 546 \text{ nm}$ festgelegt. Bei Achromaten werden die Designwellenlängen der blauen und der roten Farbe ($\lambda_{Db} = 480 \text{ nm}$ und $\lambda_{Dr} = 644 \text{ nm}$) durch Korrekturgläser so abgestimmt, dass für die Brennweiten $f(\lambda_{Db}) = f(\lambda_{Dr})$ gilt. Die Schnittweitendifferenz zwischen diesen Wellenlängen beträgt $\Delta_{sw} = 0$. Bei Apochromaten gilt zusätzlich $f(\lambda_{Db}) = f(\lambda_{Dr}) = f(\lambda_{Dg})$.

eines Mediums ist abhängig von der Wellenlänge λ , die das Medium durchströmt. Durch diesen Zusammenhang entstehen somit auch wellenlängenabhängige Brennweiten, die eine Schnittweitendifferenz von mehreren Mikrometern verursachen können. Objektivhersteller stecken sehr viel Entwicklung und Know-How in die Korrektur diesen Fehlers. Dafür werden zusätzliche Korrekturgläser in das Objektiv verbaut [67]. Dadurch werden die Schnittweiten bestimmter Designwellenlängen (blau: 480 nm, gelb-grün: 546 nm, rot: 644 nm) aufeinander abgestimmt. Zwischen den Designwellenlängen bildet sich der Farblängsfehler, wenn auch verringert, weiterhin aus. In Abbildung 1.13 wird die Farbkorrektur für Achromaten und Apochromaten qualitativ veranschaulicht [65]. Achromaten werden auf die Designwellenlängen der blauen und der roten Farbe korrigiert, Apochromaten zusätzlich noch auf die der gelb-grünen Farbe. Informationen zur konkreten Farbkorrektur werden von den Objektivherstellern meist nur firmenintern zur Verfügung gestellt. Es ist zu vermuten, dass sich zwischen der Fabrikationswellenlänge ($\lambda_P = 405 \text{ nm}$) und der Wellenlänge des Fokussensors ($\lambda_{BS} = 650 \text{ nm}$) trotz Farbkorrektur eine Schnittweitendifferenz bildet, die zur Erhöhung der Abbildungsgröße und der critical dimensions führt.

1.6 Optische Nullpunktsensorik

Der optische Nullpunkt eines Sensors entspricht einem physikalischem Fixpunkt im Messsystem. Je nach physikalischem Messprinzip ergeben sich unterschiedliche Null- und Arbeitspunkte. Häufig werden in der optischen Messtechnik, aufgrund ihrer räumlichen Stabilität, Fokuspunkte von Laserlichtquellen als Fixpunkte genutzt. Zu derer Detektion haben sich die Techniken der Laserfokus- und der Konfokalsensorik bewährt. Häufig arbeiten Nullpunktsensoren nach dem differentiellen Prinzip. Es werden also mindestens zwei Signale benötigt. Das daraus resultierende Differenzsignal zeichnet sich durch eine größere Stabilität als ein einzelnes Absolutsignal aus (vgl. Abbildung 1.3) [29].

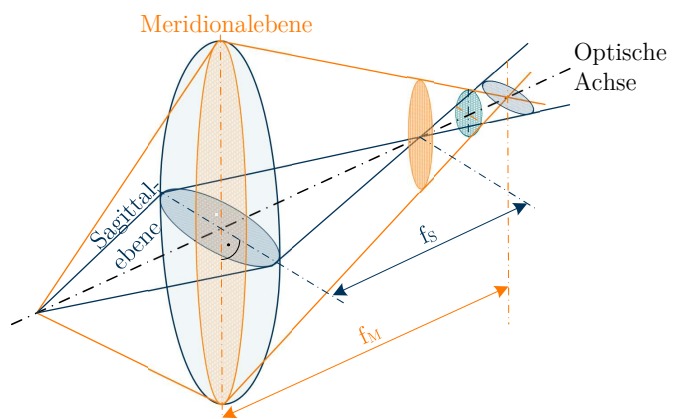
1.6.1 Differentielle Laserfokussensorik

Bei Laserfokussensoren wird der Fokuspunkt als fixe Regelgröße genutzt. Es gibt unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung der Fokalebene. Oft werden bestimmte optische Effekte der optischen Bauelemente gezielt ausgenutzt. Sensorisch wird dazu die Position der Fokalebene durch Auswertung von Intensitätsverteilungen auf Photodiodenanordnungen bestimmt. Etabliert haben sich vor allem das astigmatische Verfahren und die Methode der Foucaultschen Schneide [31].

1.6.1.1 Astigmatische Fokusdetektion

Astigmatismus entsteht, wenn sich aufgrund schrägen Lichteinfalls oder einer nicht rotationssymmetrischen Geometrie der Optik, in zwei senkrecht zueinander stehenden Ebenen verschiedene Brennweiten ausbilden. Die so entstehenden Fixpunkte können sensorisch zur Fokuspunktdetektion genutzt werden [31, 68].

Abbildung 1.14: Funktionsweise einer astigmatischen Linse: Aufgrund der unterschiedlichen Krümmungsradien in der Meridional- und Sagittalebene einer elliptischen Linse entstehen unterschiedliche Brennweiten, die sensorisch zur Fokuspunktdetektion genutzt werden können [31, 68].



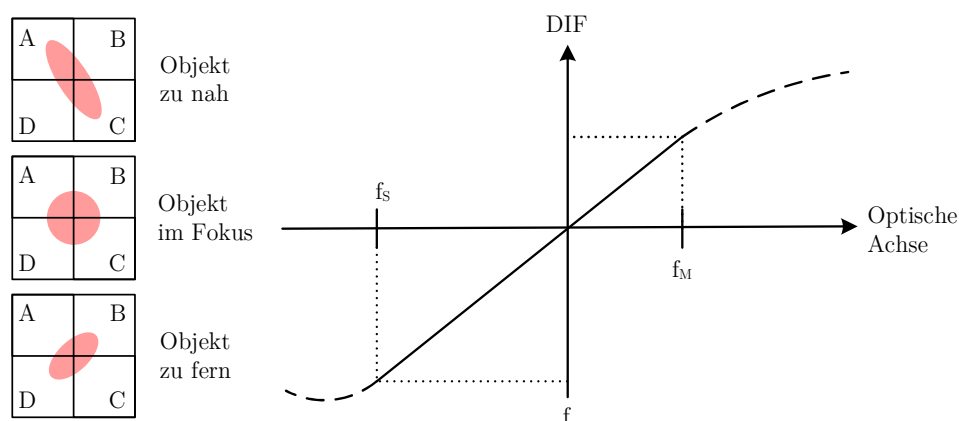


Abbildung 1.15: Qualitatives astigmatisches Differenzsignal: Die auf der Quadrantendiode abgebildete Ellipse beschreibt den Fokuszustand. Zwischen der Meridional- und Sagittalbrennebene gibt es einen Bereich, in der die Abbildung beider Achsen gleich groß ist und ein kreisrundes Bild entsteht. Das Differenzsignal entspricht an dieser Stelle $DIF = 0$.

In der sensorischen Anwendung nutzt man z. B. torische Systeme, wie astigmatische Linsen, die diesen Brennweitenunterschied hervorrufen. Eine solche Linse hat eine elliptische Form und bildet in der Meridional- und Sagittalebene unterschiedliche Brennweiten f_M und f_S in Abhängigkeit des Krümmungswinkels der jeweiligen Linsenebene aus (vgl. Abbildung 1.14). In den jeweiligen Brennebenen entstehen zwei elliptische Linienabbildungen [61]. Zwischen den Brennebenen existiert ein Bereich, in welchem die meridionale und sagittale Ausdehnung gleich sind und ein kreisrundes Bild entsteht. Durch eine adäquate Anordnung dieser Linse im optischen Strahlengang des Messsystems entsteht die kreisrunde Abbildung genau dann, wenn der Fokuszustand erreicht ist. Durch die Auswertung mit einer Quadrantendiode wird das benötigte Differenzsignal erzeugt [31]. Dieses Signal entspricht einen Spannungswert, der sich aus den vier Einzelspannungen der jeweiligen Quadranten der Photodiode zusammensetzt:

$$DIF_{QD} = (U_A + U_C) - (U_B + U_D) \quad (1.14)$$

Aufgrund der eindeutigen, sich während der Defokussierung rotierenden elliptischen Abbildung, kann im Differenzsignal ein linearer Bereich um den Nulldurchgang gefunden werden. Abbildung 1.15 zeigt qualitativ einen astigmatischen Differenzsignalverlauf.

1.6.1.2 Foucaultsche Fokusedetektion

Das Prinzip der Foucaultschen Schneide wurde ursprünglich für die Prüfung sphärischer Spiegel entwickelt [69]. Das Verfahren beruht auf dem Prinzip, einen Teil einer optischen

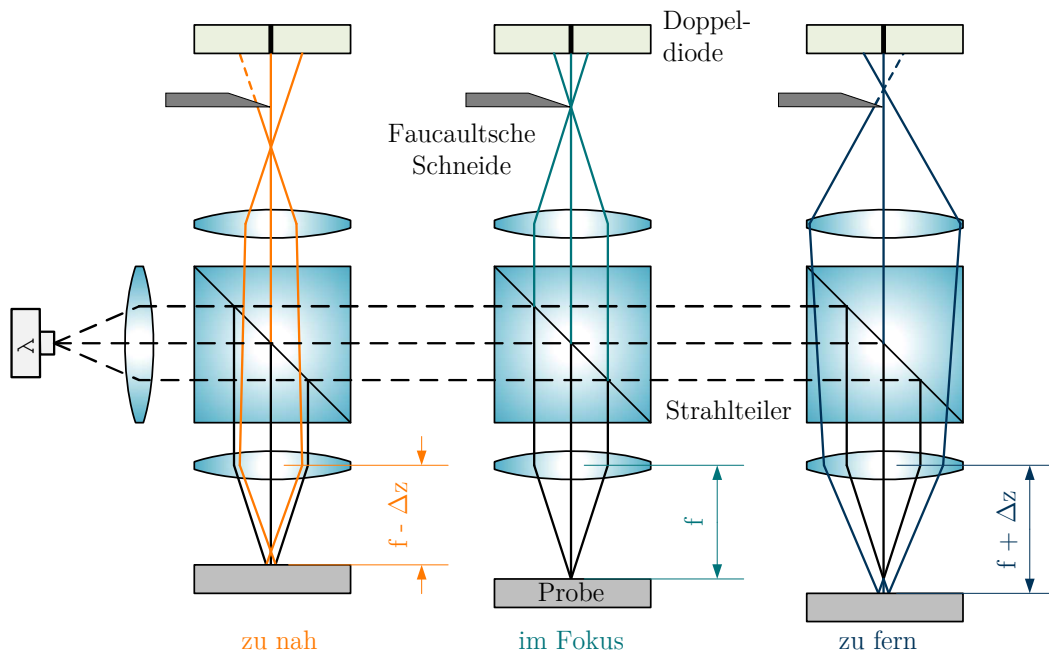
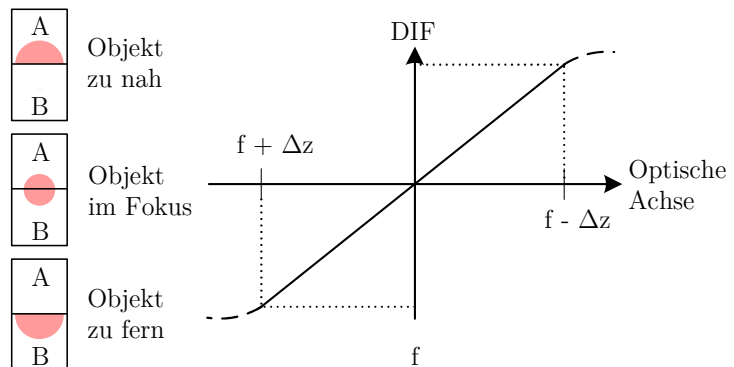


Abbildung 1.16: Grundprinzip der Fokuspunktdetektion nach der Foucaultschen Methode.

Abbildung durch einen scharfen Kantenübergang - die Schneide - zu verdecken. Die Schneide wird in der bildseitigen Fokalebene eines optischen Systems wie in Abbildung 1.16 positioniert [70]. Dahinter detektiert eine Doppeldiodenanordnung den Lichtanteil, der nicht abgeschattet wird. Der Übergang zwischen den aktiven Bereichen der Photodiode (Steg) wird in der optischen Achse platziert [71]. Liegt die Probe zu weit von der objektseitigen Fokalebene entfernt, verschiebt sich die bildseitige Fokalebene zwischen Schneide und Doppeldiode (vgl. Abb. 1.16, rechts). Dabei wird eine Hälfte des Strahlenbündels von der Schneide abgeschattet und nur eine Hälfte der Doppeldiode beleuchtet. Liegt das Objekt zu nah an der fokussierenden Optik, verschiebt sich der bildseitige Fokuspunkt vor die Schneide, sodass in diesem Fall die andere Hälfte des Strahlenbündels abgeschattet wird (vgl. Abb. 1.16, links). Ein Foucaultscher Fokuspunktsensor kann im

Abbildung 1.17: Qualitatives foucaultsches Differenzsignal: Der Fokussierungszustand wird bei dieser Methodik über die Intensitätsverteilung auf den jeweiligen Hälften der Doppeldiode beschrieben.



einfachsten Fall aus einer schmalbandigen Lichtquelle, einer Linsenanordnung, einem Strahlteiler, der Schneide und einer photoempfindlichen Doppeldiode aufgebaut werden. Das Differenzsignal wird hier auf die Doppeldiodenanordnung angepasst und verkürzt sich zu

$$DIF_{DD} = U_A - U_B. \quad (1.15)$$

Das Differenzsignal bildet sich nach dieser Formel, wie in Abbildung 1.17 qualitativ dargestellt, aus. In [72] wird ein Biprisma als Schneideelement empfohlen. Dadurch wird der Strahl aufgespalten und vier Signale auf zwei Doppeldioden erzeugt, wodurch es zu einer Verdopplung der Empfindlichkeit kommt [31].

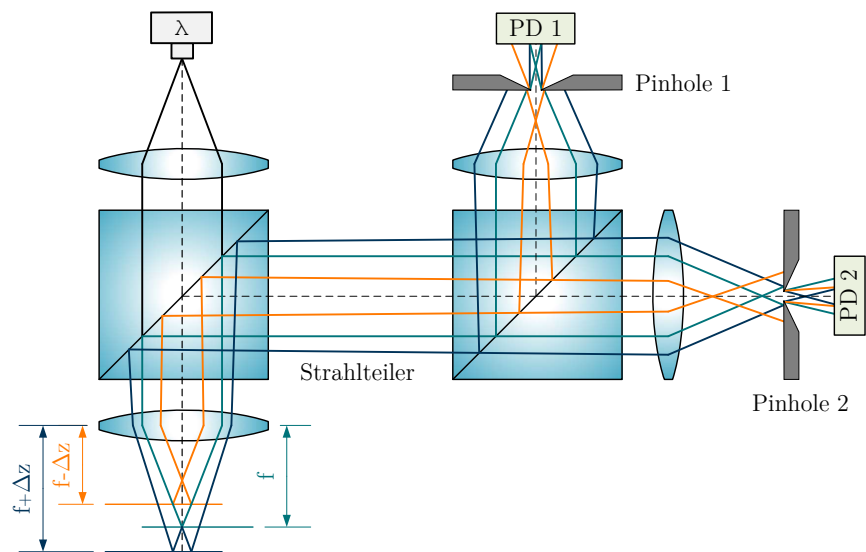
1.6.2 Differentielle Konfokalsensorik

Das konfokale Prinzip wurde im Jahr 1957 von *Prof. Marvin Minsky* vom *Massachusetts Institute of Technology* erstmals beschrieben und patentiert [73–75]. Das Prinzip beruht auf der punkt- oder auch flächenweisen Abtastung eines Objektes, bei der nur die Bereiche abgebildet werden, die in der momentan fokalen Ebene liegen. Dafür wird in der zur Objektebene konjugierten Bildebene eine Lochblende (Pinhole) positioniert, wodurch alle defokussierten Objektpunkte abgeschattet werden [76]. Die Lochblende und der beleuchtete Objektpunkt befinden sich zeitgleich im Fokus - sie sind konfokal zueinander. Durch eine Abtastung entlang der optischen Achse kann auf diese Weise ein Bild zusammengesetzt werden, das in jeder Ebene scharf ist. Besonders in der Mikroskopie werden konfokale Aufbauten gern genutzt, um Objekte detailreich und mit hohem Kontrast darzustellen [77–79]. Bei einfachen konfokalen Sensoren wird nur ein Signal gebildet, dessen Maximum die Position der Fokalebene angibt. Das Einzelsignal ist sensorisch nicht gut auswertbar, da der Fixpunkt als Umkehrpunkt im Maximum liegt. Das Regelsignal liegt dann in einer Unstetigkeitsstelle. Um auch im konfokalen Prinzip ein differentielles, eindeutiges Signal zu erzeugen, wird ein weiteres Hilfssignal benötigt [80]. Eine generelle Unterteilung der differentiell arbeitenden konfokalen Sensoren findet sich in der Art der Erzeugung der benötigten Signale.

1.6.2.1 Mechanisch konfokale Sensoren

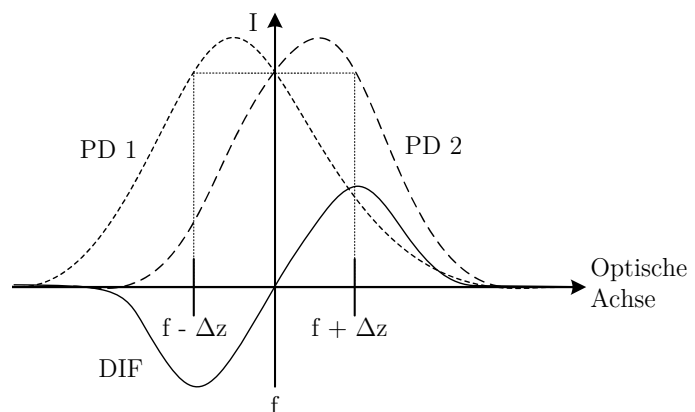
Anfangs arbeiteten differentielle konfokale Sensoren in der Regel mit zwei mechanischen Lochblenden. Durch eine spezielle Anordnung dieser Lochblenden im Strahlengang ist

Abbildung 1.18:
Prinzipieller Aufbau
eines mechanisch
konfokalen Nullpunkt-
sensors.



es möglich, mit einer schmalbandigen Lichtquelle zwei zueinander versetzte Signale zu erzeugen. Abbildung 1.18 zeigt den möglichen Aufbau eines solchen Sensorsystems. Ein in der Fokalebene liegendes Objekt wird mit einer schmalbandigen Lichtquelle bestrahlt. Das reflektierte Licht wird durch einen Strahlteiler umgelenkt und in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Dies dient der Erzeugung der zwei photoelektrischen Signale. Beide Teilstrahlen werden wieder fokussiert und durch ein konfokales Pinhole jeweils auf eine Photodiode (PD 1 und PD 2) abgebildet. Die Pinholes sind so platziert, dass die konjugierte Bildebene bei Objektfokussierung in einer Messachse vor und in der anderen Achse hinter dem Pinhole entsteht. Die entstehenden Kennlinien haben einen geringfügigen Versatz zueinander, wodurch wiederum ein Differenzsignal mit einem eindeutigen Nulldurchgang erzeugt werden kann. In Abbildung 1.19 sind diese Signale qualitativ dargestellt.

Abbildung 1.19: Qualitative Darstellung der mechanisch konfokalen Signalbildung: Auf den Photodioden entstehen zwei versetzte Intensitätssignale. Die Fokusposition findet sich im Schnittpunkt beider Verläufe. Dort befindet sich im Differenzsignal DIF der Nulldurchgang (vgl. auch Abb. 1.3).



1.6.2.2 Chromatisch konfokale Sensoren

Seit der Entwicklung der Lasertechnik und der stetig wachsenden Anzahl verschiedener spektraler Lichtquellen, wird in differentiellen konfokalen Aufbauten oftmals auf die zweite Lochblende verzichtet und das Differenzsignal durch eine zusätzliche Lichtwellenlänge erzeugt [81]. Diese Sensoren werden als chromatisch konfokale Sensoren bezeichnet [82]. Chromatisch konfokale Nullpunktsensoren nutzen den physikalischen Effekt der Dispersion aus. Dieser Effekt wurde bereits in Kapitel 1.5.2 beschrieben. Die Dispersion an einer Optik führt zu unterschiedlichen Brennweiten für verschiedene Wellenlängen. Üblicherweise wird die Brennweite einer Linse für die Wellenlänge $\lambda_{Dg} = 546 \text{ nm}$ definiert [67]. Im nach Abbildung 1.20 gezeigten Aufbau werden die Wellenlängen so gewählt, dass gilt: $\lambda_1 < \lambda_{Dg}$ und $\lambda_2 > \lambda_{Dg}$. Dadurch bilden sich unterschiedliche Brennweiten $f(\lambda_1)$ und $f(\lambda_2)$ aus. Die Fokalebene der kürzeren Wellenlänge entsteht somit vor und die der längeren Wellenlänge hinter der eigentlichen Brennebene. Selbes geschieht entsprechend auf der Bildseite. Zur Trennung der Wellenlängen dient ein dichroitischer Spiegel. Zwei Photodioden nehmen die separierten Signale auf. Das Pinhole wird bildseitig zwischen den zwei Fokalebeneen so platziert, dass die Photodioden die gleiche Signalstärke erzeugen, wenn sich das Messobjekt im Fokus befindet. Wird das

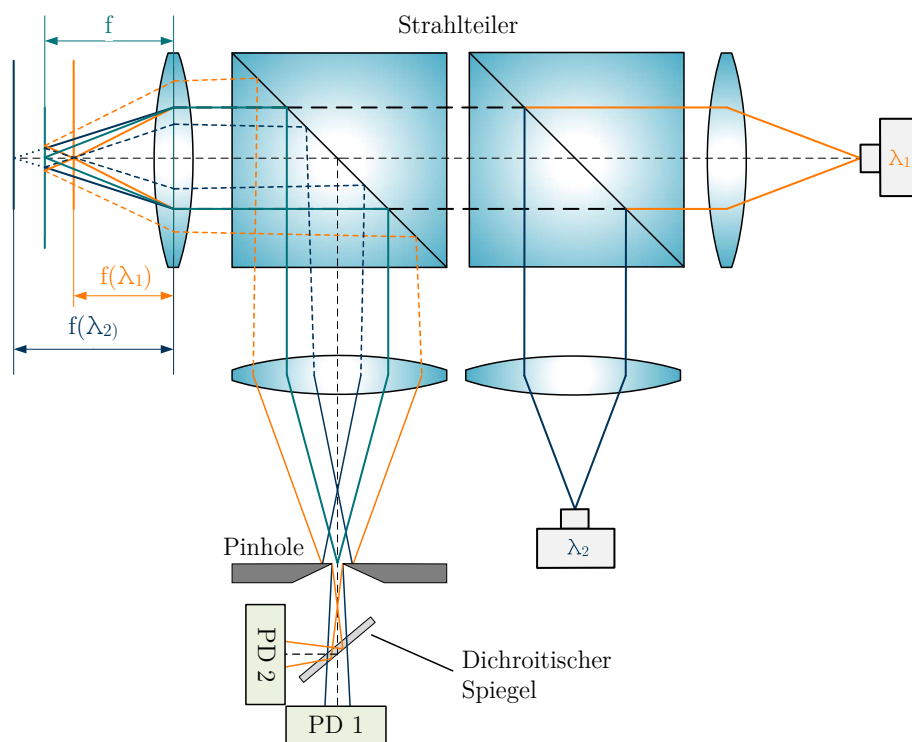
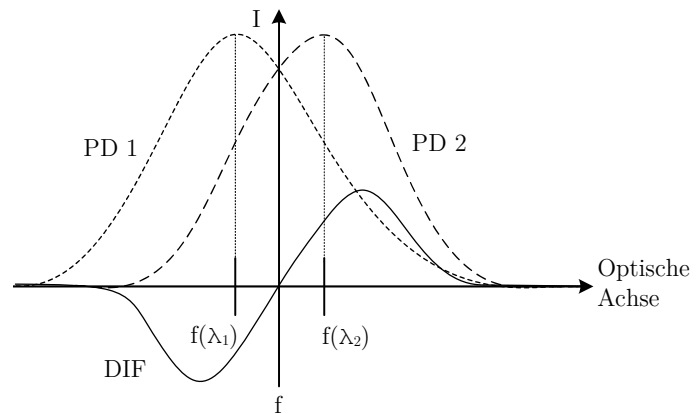


Abbildung 1.20: Prinzipieller Aufbau eines chromatisch konfokalen Nullpunktsensors.

Abbildung 1.21: Qualitative Darstellung der chromatisch konfokalen Signalbildung: Ähnlich wie beim mechanisch konfokalen Prinzip, entsteht aufgrund der unterschiedlichen Brennweiten der Wellenlängen ein Versatz zwischen den Signalen der zwei Photodioden.



Messobjekt defokussiert, entsteht, ähnlich wie beim mechanisch konfokalen Prinzip, ein Kennlinienversatz zwischen den zwei Signalen. Abbildung 1.21 zeigt die qualitativen Signalverläufe der einzelnen Wellenlängen und das resultierende Differenzsignal.

1.6.2.3 Modulierbar konfokale Sensoren

Neben den mechanisch und chromatisch konfokal arbeitenden Sensoren, bieten modulierbare konfokale Aufbauten aufgrund ihrer Flexibilität in Zukunft ein hohes Potential für differentielle sensorische Anwendungen. Signalmodulierbare Aufbauten bieten den Vorteil ohne Änderungen der optischen und optoelektronischen Bauteile einfach und schnell an unterschiedliche Messbedingungen angepasst werden zu können.

In [83, 84] wird einer der ersten modulierbar konfokalen Aufbauten beschrieben, der aufgrund seiner Funktionsweise mit nur einer Wellenlänge und auch nur einem Pinhole ein adäquates Differenzsignal erzeugen kann. Die Modulation wird durch eine akustisch getriebene Flüssigkeitsgradientenlinse (*TAG Linse*) erzielt [85–87]. Diese Linse wird in Kombination mit einem akustischen Modulator betrieben [88]. Dieser sorgt dafür, dass sich die Brennweite der Linse in Abhängigkeit der am Modulator eingestellten Spannung ändert. Durch eine hochfrequente Spannungsänderung werden so, ähnlich wie beim chromatisch konfokalen Prinzip, dynamisch verschiedene Brennebenen erzeugt, aus denen sich das Differenzsignal bilden lässt.

Am *IPMS* wird gegenwärtig ein weiterer neuer Ansatz verfolgt, wobei das konfokale Pinhole mechanisch zu einer Oszillation in Richtung der optischen Achse angeregt werden soll [89]. Dafür wird eine mit einem Pinhole versehene Membran kontrolliert in Schwingung versetzt [90]. Ebenfalls mit nur einer Wellenlänge arbeitend, werden durch die hochfrequente Verschiebung des Pinholes entlang der optischen Achse, die optischen Einzelsignale zur Bildung des differentiellen Signals gewonnen.

1.6.3 Weiterführende Literatur

In der Literatur [81, 91–99] findet man eine Vielzahl weiterer messtechnischer Konzepte zur Umsetzung von Fokussensoren und konfokalen Sensoren. In [92, 100] werden zusätzlich fasergekoppelte Fokussensoren vorgestellt. In [101–104] sind Konzepte für fasergekoppelte konfokale Aufbauten zu finden.

Sensorentwicklung für das Direct Laser Writing

2.1 Motivation und Anforderungen

Die resultierenden critical dimensions der in den Vorarbeiten erzeugten lithografischen Strukturen zeigen, dass der Fokussensor für diese Anwendung nicht ideal geeignet ist. Einige technologische Nachteile hinsichtlich der Verwendung dieses Messsystems werden bereits in den Kapiteln 1.3.2 und 1.5.2 aufgeführt. Die anderen Sensorenerweiterungen des *IPMS* (Weißlichtsensor, Tastschnittsensor, AFM-Sensor, siehe Kapitel 1.3) stellen aufgrund ihrer Funktionsweise keine Alternative für sensorgestützte Lithografieanwendungen dar. Es wird ein Sensor benötigt, der die Defizite des Fokussensors kompensiert und darüber hinaus aber ähnliche messtechnische Eigenschaften erzielt. Die diagnostizierten Probleme des Fokussensors sind nachfolgend zusammengefasst:

- Unsymmetrische Richtungs- und Oberflächenwinkelabhängigkeit
- Begrenzte Verfügbarkeit der Hologram-Laser-Unit
- Anwendbarkeit des Sensors ausschließlich bei $0,55 < NA < 0,65$
- Elektronik der Einheit führt zu Wärmeentwicklung nahe der Probe

Auf Basis dieser Defizite ist eine Anforderungsliste nach VDI-Richtlinie 2221 entstanden, die nach Pflichtanforderungen (P), Mindestanforderungen (M) und Wünschen (W) unterteilt ist (Tabelle 2.1). Dadurch werden die Anforderungen zur Optimierung des Systems strukturiert [105].

Tabelle 2.1: Anforderungsliste der Sensorneuentwicklung. **P** - Pflichtanforderung; **M** - Mindestanforderung; **W** - Wunschanforderung

#	Anforderung	Typ
1	Optische Antastung	P
2	Rotationssymmetrisches Messkonzept	P
3	Ausführung als Nullpunktsensor	P
4	Justagemöglichkeit der signalgebenden Komponenten	P
5	Integrierbarkeit eines Lithografielasers	P
6	Axiale Auflösung $R_{ax} \approx 1 \text{ nm}$	M
7	Variable numerische Apertur $NA > 0,65$	M
8	Verwendung von Standardkomponenten und Normteilen	M
9	Abmessungen geeignet zum einfachen Transport	M
10	Gewicht geeignet zum einfachen Transport	M
11	Lichtwellenleiterkopplung des Sensorkopfes	W
12	Messung des Oberflächenwinkels	W
13	Modularer und erweiterbarer Aufbau	W
14	Fertigungsaufwand auf Standardwerkzeuge begrenzt	W
15	Einfache Integration in <i>NPMM</i>	W
16	Kosten $< 5\,000 \text{ €}$	W

Der neue optische Sensor wird unter dem Aspekt der gleichzeitigen sensorischen und lithografischen Anwendung entwickelt. Er soll der *NPMM* eine differentielle Kennlinie bereitstellen, die zu höchster Präzision der Nachregelung führt. So wird sicher gestellt, gleichmäßige und gleichförmige Strukturen zu erzielen. Dementsprechend wird die Entwicklung als differentielle Nullpunktausführung ausgelegt, um dem Controller einen entsprechenden Arbeitspunkt als Regelsignal zur Verfügung zu stellen.

Für DLW-Anwendungen sind darüber hinaus schnellmessende, optische Sensoren erforderlich, um einen hohen lithografischen Durchsatz zu erzielen. Eine hohe Verfahrensgeschwindigkeit $v > 1 \text{ mm/s}$ führt außerdem dazu, dass der Fabrikationslaser zur Erzeugung der Strukturen in einem gut kontrollierbaren Leistungsbereich arbeiten kann (vgl. Abb. 1.12). Die Sensorkennlinie soll isotrop für die x- und die y-Richtung gelten, um so eine symmetrische Richtungs- und Oberflächenwinkelabhängigkeit zu garantieren.

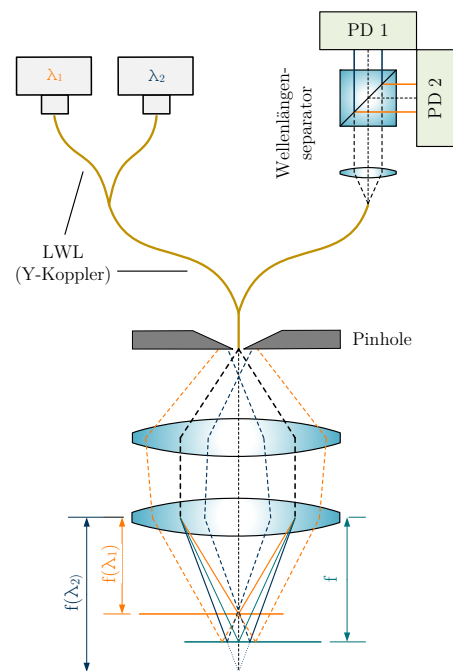
Um die laterale Auflösung des Messsystems zu steigern und zusätzlich die lithografischen Strukturbreiten zu verringern soll der Messaufbau den Einsatz von Objektiven unterschiedlicher numerischer Apertur ermöglichen. Eine LWL-Kopplung des neuen Sensors ermöglicht zusätzlich eine Reduktion des Wärmeeintrags in der Nähe der Probe und wird damit als Wunschanforderung definiert. Durch diese Anforderung wird das neue Funktionsprinzip des Sensors relativ eng begrenzt. Um Anpassungen des Messsystems für unterschiedliche Messbedingungen zu ermöglichen, wird ein modularer Aufbau verfolgt.

2.2 Basiskonzept des Sensors

Auf Grundlage des in [106] beschriebenen chromatisch konfokalen Ansatzes, wird jenes Konzept als Fundament für die Entwicklung des neuen Abstandssensors herangezogen. Das Konzept erfüllt die Pflichtanforderungen der Anforderungsliste und ermöglicht einen fasergekoppelten Sensorkopf. In Abbildung 2.1 ist das Sensorkonzept schematisch dargestellt.

Für den Aufbau werden zwei Lichtwellenlängen λ_1 und λ_2 in die gleiche Faser eingespeist. Dafür wird ein Lichtwellenleiter-Koppler (Y-Koppler) verwendet. Direkt an das Ende der Faser schließt ein zweiter Koppler an. Der objektseitige Ausgang der zweiten Faser wirkt selbst als konfokale Blende (Pinhole) und vereinfacht so die mechanische Justage des

Abbildung 2.1: Konzept des differentiellen, fasergekoppelten, chromatisch konfokalen Sensors ([106]). Die Y-Koppler leiten beide Lichtwellenlängen λ_1 und λ_2 durch die gleiche Faser. Das objektseitige Faserende der Y-Koppler-Kombination bildet die konfokale Blende (Pinhole). Das divergent austretende Licht wird durch die Linsen Kombination kollimiert und auf eine Probe fokussiert. Aufgrund der Dispersion entstehen zwei Fokalebenen. Befindet sich die Probe in einer der Fokalebenen, wird die entsprechende Wellenlänge mit hoher Intensität in die Faser zurück gekoppelt. Die zweite Wellenlänge wird aufgrund des Versatzes zu ihrer Fokalebene nur mit relativ geringer Intensität in die Faser zurück gekoppelt. Der bildseitige Faserausgang ist auf einen Wellenlängenseparator gerichtet. Dieser trennt die zwei Wellenlängen und richtet sie jeweils auf eine Photodiode aus. Die Photodioden erzeugen so die zwei versetzten Signale entlang der optischen Achse (vgl. Abb. 1.21).



Systems. Hinter der Faser wird das austretende Licht kollimiert und anschließend durch ein Objektiv auf die Probe fokussiert. Befindet sich die Probenoberfläche in einer der zwei durch die Dispersion hervorgerufenen Fokalebene, wird das Licht der entsprechenden Wellenlänge mit hoher Intensität in die Faser rückgekoppelt. Entsprechend gelangt nur ein abgeschwächter Teil der zweiten Wellenlänge zurück in den Lichtwellenleiter.

Am bildseitigen Ausgang der Lichtwellenleiterkombination tritt das Licht beider Laserdioden wieder aus, wird kollimiert, separiert und jeweils auf eine der Photodioden abgebildet. Befindet sich die Probenoberfläche etwa mittig zwischen den zwei Fokalebene, registrieren die Photodioden die gleiche Intensität. Dort befindet sich im Differenzsignal der Nulldurchgang entsprechend Abbildung 1.21.

Das Konzept zeichnet sich durch einen einfachen und kompakten Aufbau aus. Der Lichtwellenleiter trennt die Optoelektronik vom Sensorkopf, reduziert so den Wärmeeintrag an der Probe und wirkt gleichzeitig als konfokale Blende. Für den Aufbau werden einzig zwei fasergekoppelte Laserdioden, zwei Y-Koppler, zwei Photodioden, ein separierendes optisches Element zur Trennung der Lichtwellenlängen, sowie zwei Kollimatoren und ein Objektiv benötigt. Der sensorische Messbereich wird durch die zwei Brennebenen der Laser begrenzt und ist von der chromatischen Aberration des verwendeten Objektiv abhängig. Um den Sensor sowohl mit Achromaten als auch Apochromaten ausstatten zu können, sollte auf die Verwendung der Designwellenlängen λ_{Db} , λ_{Dg} und λ_{Dr} verzichtet werden (vgl. Abbildung 1.13). Da die Hersteller nur selten Informationen zur konkreten Farbkorrektur ihrer optischen Systeme herausgeben, müssen heuristische Untersuchungen mit unterschiedlichen Mikroskopobjektiven durchgeführt werden.

2.3 Aufbau des Sensors

2.3.1 Konzeptanpassung

Das zugrundeliegende Konzept muss nun konkretisiert und für die geplante Anwendung angepasst werden. Die Überarbeitungen sind aus der Funktionsstruktur (Abbildung 2.2) abzulesen. Die Erarbeitung der Funktionsstruktur gehört zum konstruktiven Entwicklungsprozess und ermöglicht durch die Kennzeichnung der Signalübertragung ein leichteres Verständnis der geplanten sensorischen Funktionalität.

Um höchste laterale Auflösung zu erzielen und gleichzeitig Speckleeffekte zu vermeiden, werden Singlemode-LWL verwendet [107]. Da Singlemodedefasern im sichtbaren spektralen Bereich relativ schmalbandig ausgelegt sind ($\pm 15 \text{ nm} - \pm 75 \text{ nm}$), wird die

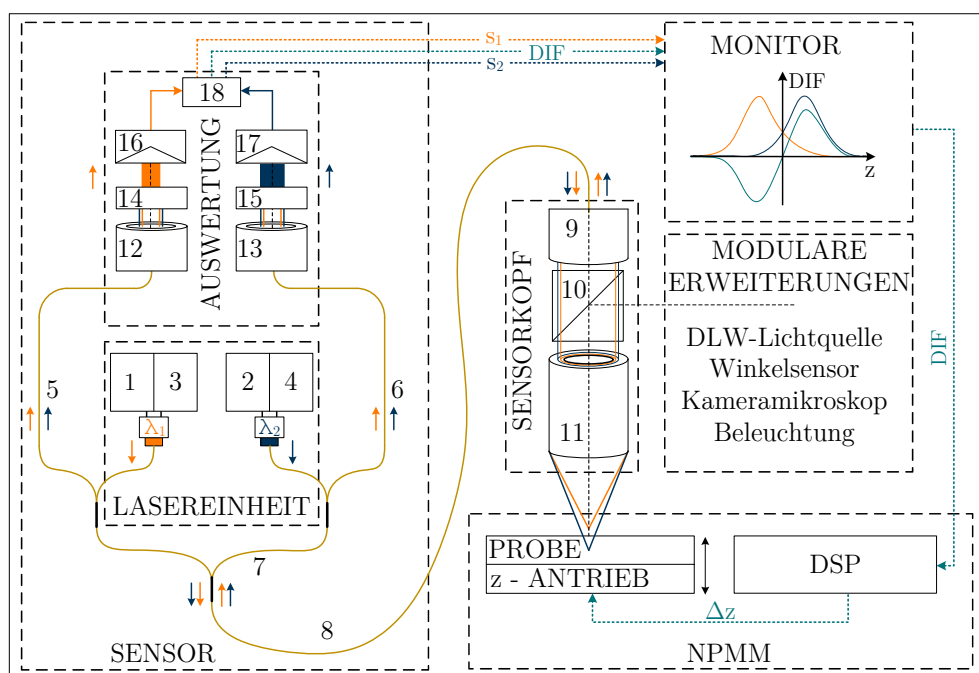


Abbildung 2.2: Funktionsstruktur des chromatisch konfokalen Sensorkonzepts:

- | | | |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 1, 2 Laserdiodencontroller | 3, 4 Temperaturcontroller | 5, 6, 7 Y-Koppler (SM) |
| 8 Lichtwellenleiter (SM) | 9 Faserkollimator | 10 Strahlteilerwürfel |
| 11 Objektiv | 12, 13 Kollimator | 14 Spektralfilter λ_1 |
| 15 Spektralfilter λ_2 | 16, 17 Photodiode | 18 Differenzverstärker |

Auswahl der Laserdioden (LD) eingeschränkt. Darüber hinaus muss die Leistung der Laserdioden so gewählt sein, dass ein zufriedenstellendes Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: signal-noise-ratio (SNR)) resultiert. Die Laserdioden werden an spezielle Laserdioden- und Temperaturcontroller (1 - 4) angeschlossen. Diese ermöglichen den Betrieb der Laser bei der vom Hersteller empfohlenen Operationsstromstärke I_{OP} und vermindern so Leistungsschwankungen. Die Lasereinheit und der Sensorkopf werden über einen zusätzlichen Lichtwellenleiter (8) verbunden. Dieser ist direkt mit dem Kollimator (9) des Sensorkopfes verbunden. Ein Strahlteilerwürfel (10) ermöglicht die Integrierung weiterer modularer Aufbauten und die Einkopplung des Lithografielasers.

Im Gegensatz zum ursprünglichen Konzept, wird die Aufteilung des Lichts zu den Photoempfängern durch einen zusätzlichen Y-Koppler realisiert. Die Y-Koppler werden bildseitig mit Kollimatoren (12, 13) verbunden. Die Separation der Lichtwellenlängen erfolgt durch schmalbandige optische Filter (14, 15) [108]. Dahinter werden die Photodioden (16, 17) platziert. Der Differenzverstärker (18) bildet das differentielle Signal und übergibt dieses dem digitalen Signalprozessor (DSP) der NPMM zur Nachregelung der Höhenabweichung Δz während des Messprozesses.

2.3.2 Die sensorische Einheit

Der konkretisierte Aufbau der sensorischen Einheit ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Um die spätere lithografische Anwendung nicht zu beeinträchtigen, werden für den Aufbau des Messsystems Laserdioden mit Wellenlängen im roten spektralen Bereich eingesetzt. Darüber hinaus muss die Auswahl der Laserdioden verschiedene Anforderungen erfüllen. Zum einen sollen die zwei Laserdioden Licht im gleichen Leistungsbereich emittieren. Das bildet die Grundlage für ein symmetrisches Differenzsignal und erleichtert die spätere Justage und Auswertung. Desweiteren muss die Wellenlängendiskrepanz der zwei Laserdioden so gering sein, dass sie mit möglichst geringen Verlusten in ein und dieselbe Faser eingekoppelt werden können. Bei der Laserauslegung muss außerdem darauf geachtet werden, dass es für die Wellenlängen entsprechende Elemente zur spektralen Separation gibt. Nur so können die optoelektronischen Signale sauber voneinander getrennt und erfasst werden und ein differentielles Regelsignal gebildet werden.

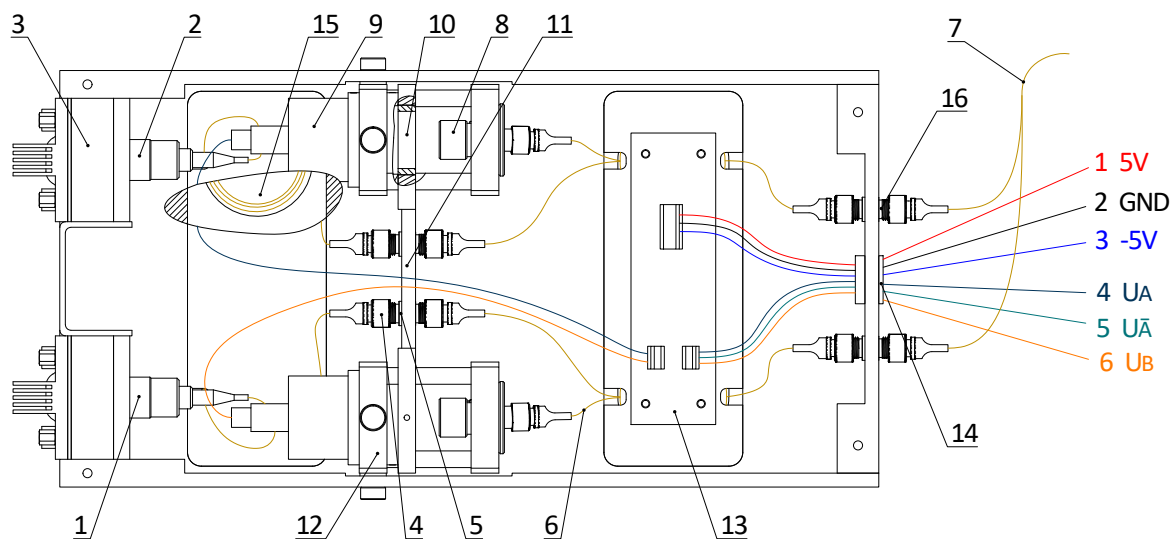


Abbildung 2.3: Konkretisierter Entwurf der Sensoreinheit:

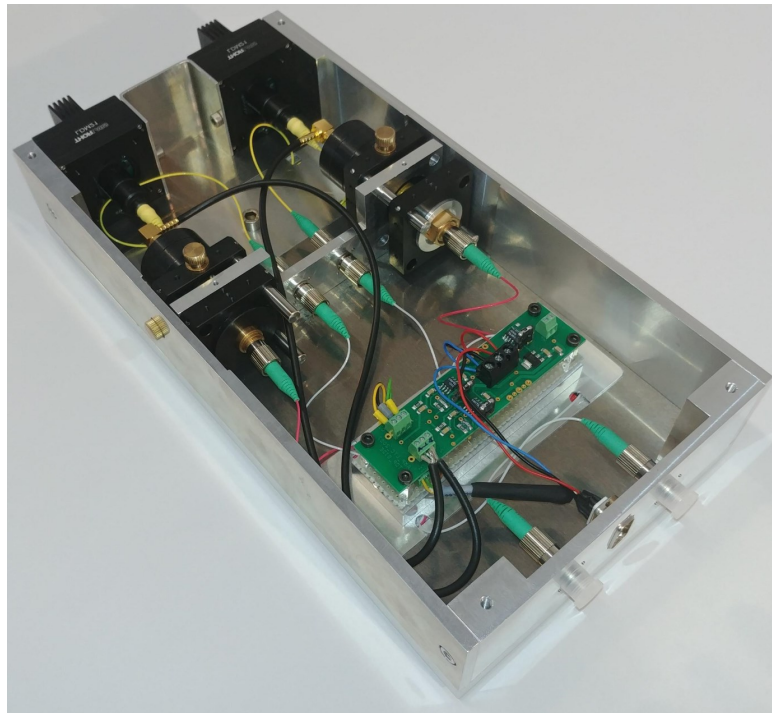
- | | |
|--|---|
| 1 Laserdiode Thorlabs LP642-SA20-SP | 2 Laserdiode Thorlabs LP660-SA20-SP |
| 3 Laserdiodengehäuse Throlabs LDM21 | 4 APC-Stecker |
| 5 LWL-Kupplung Thorlabs ADAFC3 | 6 Y-Koppler Thorlabs TW630R5A1 |
| 7 Y-Koppler Lightel FBG Coupler | 8 Kollimator |
| 9 Photoempfänger Osram BPX 61 | 10 Farbfilter Thorlabs FB660-10/FB640-10 |
| 11 Zwischenwand zur Fassung der Farbfilter | 12 Justageelement Qioptiq: G061025000 |
| 13 Verstärker- und Inverterschaltung | 14 Elektrischer D-Sub-Anschluss |
| 15 Lichtwellenleiteraussparung | 16 Optischer Anschluss für den Sensorkopf |

Die bereits mit Singlemode-Lichtwellenleitern ausgestatteten Laserdioden (1, 2) der Typen *Thorlabs LP642-SA20-SP* und *Thorlabs LP660-SA20-SP* mit den Wellenlängen $\lambda_1 = 642\text{ nm}$ und $\lambda_2 = 662\text{ nm}$ und einer typischen Laserleistung von $P = 20\text{ mW}$ stellen sich als kostengünstige Lösung heraus [109, 110]. Der Wellenlängenunterschied von $\Delta\lambda = 20\text{ nm}$ eignet sich zur gleichzeitigen Einkopplung beider Wellenlängen in denselben Y-Koppler. Die Wellenlängen liegen in einem Spektralbereich, in der sowohl Apochromaten als auch Achromaten aufgrund ihrer Farbkorrektur eine gewisse Schnittweitendifferenz verursachen und so einen sensorischen Arbeitsbereich aufspannen sollten (vgl. Abbildung 1.13). Für beide Wellenlängen sind schmalbandige Farbfilter mit einer Halbwertsbreite von 10 nm verfügbar [111, 112]. Die Laserdioden werden in *Thorlabs LDM21*-Gehäusen (3) zur Ansteuerung und Wärmeabfuhr gefasst [113]. Diese ermöglichen einen direkten Anschluss an die Laserdiodencontrollermodule *LDC8002* zur Einstellung der Versorgungsstromstärke, sowie an die Temperaturcontrollermodule *TED8020* zur Überwachung und Regelung der Lasertemperatur [114, 115].

Alle Lichtwellenleiter innerhalb der Sensorbox werden mit Angled Physical Contact-Steckern (APC-Steckern) (4) konfektioniert. Diese Steckertypen besitzen winklig angeschliffene LWL-Stirnflächen, die zu einer erhöhten Rückflusdämpfung des Lichts führen. So wird das durch Störreflexe verursachte Signalrauschen beim Übergang des Lichts von einer zur nächsten Faser vermindert [116]. Die Lichtwellenleiter werden mittels spezieller Kupplungen des Typs *Thorlabs ADAFC3* (5) verbunden [117]. Die direkt an die Laserdioden angeschlossenen Y-Koppler *Thorlabs TW630R5A1* (6) sind für die Zentralwellenlänge $\lambda_C = (630 \pm 50)\text{ nm}$ ausgelegt. Laut Herstellerinformationen tritt im Bereich von $\lambda = 630\text{ nm} - 680\text{ nm}$ eine maximale Intensitätsdämpfung von $0,5\text{ dB}$ auf. Die objektseitigen Ausgänge der Y-Koppler werden mit Hilfe der genannten Kupplungen an der Innenseite des Gehäuses befestigt. So kann der zusätzliche dritte Y-Koppler (7) zur Zusammenführung beider Lichtwellenlängen modular an die Sensorbox angeschlossen werden.

Das aus der Faser austretende Licht wird kollimiert und auf die Photoempfänger *Osram BPX 61* (9) gerichtet. Zwischen Kollimator (8) und Photoempfänger führen die Farbfilter *Thorlabs FB640-10* und *Thorlabs FB660-10* (10) zur Trennung der Lichtsignale. Die Farbfilter sind in einer Zwischenwand (11) im Gehäuseinneren gefasst. Um das kollimierte Licht optimal auf den Photodioden abzubilden, werden für beide Lichtkanäle Justageelemente (12) zur lateralen Ausrichtung der Photodiode vorgesehen. Dadurch können die zwei photoelektrischen Signale aufeinander abgestimmt werden. Die Photodioden sind an eine im *IPMS* entwickelte Differenzverstärkerplatine (13)

Abbildung 2.4: Aufbau der Sensoreinheit (Abbildung ohne Deckel)



angeschlossen. Die Steuerelektronik der *NPMM* greift die elektrischen Ausgangssignale U_A , $U_{\bar{A}}$ und U_B an der D-Sub-Durchführung (14) ab.

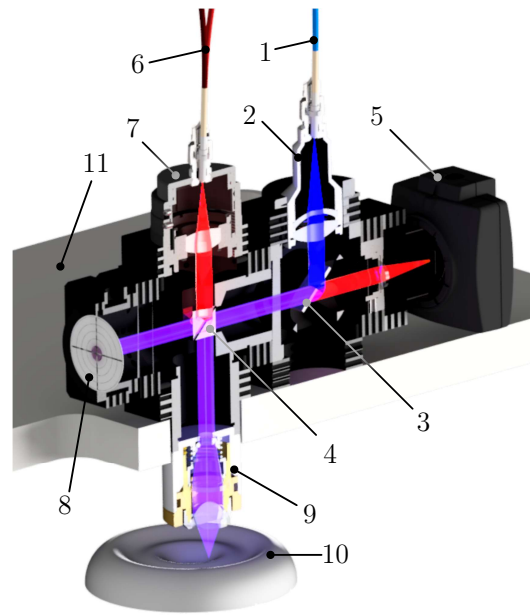
Das Gehäuse der Einheit ist kompakt konstruiert und schirmt die elektrischen Leitungen und die Verstärkerelektronik ab. Im Boden des Gehäuses sind großzügige Aussparungen für die mehreren Meter Lichtwellenleiter vorgesehen (15). Die Sensoreinheit wird über die optischen Anschlüsse (16) und den Y-Koppler (7) mit dem Sensorkopf verbunden. Die elektrischen Signale des konfokalen Systems sind so angepasst, dass sie mit der Signalverarbeitungseinheit des Laserfokussensors kompatibel sind. Dadurch bleibt eine aufwendige soft- und hardwareseitige Neuintegration des neuen Sensorsystems erspart. Abbildung 2.4 zeigt die zusammengesetzte Sensoreinheit.

2.3.3 Der Sensorkopf

Der eigentliche Sensorkopf besteht nur aus einem Kollimator und dem Objektiv. Wie in der Funktionsstruktur in Abbildung 2.2 bereits vorgesehen, wird zwischen den beiden Elementen noch ein Strahlteilerwürfel platziert, um den Aufbau modular zu gestalten und weitere Strahlengänge in das System einkoppeln zu können. So kann beispielsweise das Digitalmikroskop des Laserfokussensors ebenfalls über diesen zweiten Lichtweg mit dem Sensor kombiniert werden [31]. Die Erweiterungen können durch das *Qioptiq* Stecksystem jederzeit geändert oder ausgetauscht werden.

Abbildung 2.5: Schnittansicht des Sensorkopfes mit lithografischer Erweiterung [118]:

- 1 Lithografielaser *SuK 51nanoL-S*
- 2 Kollimator *Thorlabs F810APC*
- 3 Dichroitischer Spiegel *Edmund Optics 69-876*
- 4 Strahlteilerwürfel *Thorlabs BS037*
- 5 Beobachtungskamera *iDS UI-1540LE-M-GL*
- 6 Y-Koppler *Lightel FBG Coupler*
- 7 *Qioptiq Fokussierkollimator MB 04*
- 8 Schirm zur vereinfachten Justage
- 9 Objektiv
- 10 Probe
- 11 Sensorplatte der *NPMM*



Die Anwendung des Sensors gilt in erster Linie dem lithografischen Direct Laser Writing. In Abbildung 2.5 ist der Sensorkopf um den lithografischen Strukturierungslaser (1) und eine Beobachtungskamera (5) erweitert worden. Die Kamera wird zur Überprüfung der optischen Probenantastung genutzt. Der fasergekoppelte Lithografielaser ist an einen für die Wellenlänge $\lambda_P = 405 \text{ nm}$ ausgelegten Kollimator (2) angeschlossen und wird über einen dichroitischen Spiegel (3) und den Strahlteilerwürfel (4) in den kollimierten Strahlengang des konfokalen Sensors gerichtet. Der Strahlteilerwürfel transmittiert 90 % und reflektiert nur 10 % der Strahlung. So wird die Intensität des Messtools nicht unnötig verringert und die ohnehin zu hohe Intensität des Lithografiertools entsprechend gesenkt (vgl. auch Abbildung 1.12).

Um den Fokalebeneversatz zwischen den Bearbeitungs- und Messlasern zu korrigieren, wird der Y-Koppler der Sensoreinheit an einen *Qioptiq Fokussierkollimator MB 04* (7) angeschlossen. Dieser spezielle Kollimator ermöglicht im weiteren Verlauf der Arbeit die Kompensation der Schnittweitendifferenz zwischen der Lithografie- und den Messwellenlängen durch die axiale Verschiebung der Kollimatorlinse. Ein Schirm mit Ringmarkierungen (8) erleichtert die Justage der Strahlengänge zueinander.

Der mechanische Aufbau ist kompatibel mit der Sensorplatte (11) der *Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. Der Sensorkopf kann im Gesamten von der Sensorplatte entfernt und von den optischen Fasern getrennt werden. Dies ermöglicht einen einfachen Austausch der Sensorik.

2.3.4 Das Objektiv

Heutige Hochleistungsobjektive sind sehr komplex. Solche optischen Baugruppen bestehen oft aus mehreren Linsen, Dubletts, Triplets und einer Vielzahl von Zentrier- und Stellelementen [119]. Diese Objektive werden auf bestmögliche Abbildung, ohne Verzeichnungen und Farbfehler, ausgelegt. Auch wenn eine Vielzahl von kommerziell erhältlichen Objektiven zur Verfügung steht, gestaltet es sich schwierig konkrete Farbkorrekturinformationen von den Objektivhersteller zu bekommen. Objektive ohne Farbkorrektur zu erhalten, ist heutzutage kaum noch möglich.

Das Mikroskopobjektiv des konfokalen Sensors soll bei genau zwei Wellenlängen arbeiten und zwischen den Brennweiten einen möglichst definierbaren Versatz erzeugen. Es ist möglich ein solches Objektiv mit den gewünschten Spezifikationen durch einen eigenen Entwurf zu realisieren. Dadurch erhält man Flexibilität in der Wahl der Linsen und kann die optischen Eigenschaften des Systems frei bestimmen. Zudem ist es mit Hilfe der Sellmeier-Gleichung möglich, die Dispersion der Linsen zu berechnen und die Größe des Arbeitsbereiches im Vorfeld festzulegen [120]. Allerdings sollte auch eine Eigenkonstruktion eine möglichst geringe sphärische Aberration verursachen, damit die Signalqualität des Sensors nicht verringert wird.

2.3.4.1 Linsenauswahl

Die Eigenkonstruktion soll aus einer strahlaufweitenden Baugruppe und einer fokussierenden Optik bestehen. Die Strahlaufweitung ermöglicht es den Durchmesser des einfallenden, kollimierten Messstrahls ($d \approx 6 \text{ mm}$) auf die Größe der freien Apertur der Fokuslinse zu vergrößern. Für die Entwicklung des Objektives wird eine Galilei-Anordnung als Grundlage genutzt [121]. Die benötigte Vergrößerung der Baugruppe ist abhängig von der verwendeten fokussierenden Optik, die das System objektseitig abschließt. Die freie Apertur der Fokuslinse muss völlig ausgeleuchtet werden, damit die angegebene numerische Apertur erreicht wird. Das optische Design des Gesamtsystems ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

Die Auswahl der Fokuslinse geschieht anhand optischer und mechanischer Kriterien. Dazu gehören der Wert der numerischen Apertur und des Arbeitsabstandes, die Art des Glassubstrates, sowie die Abmessungen der Linse. Die Präzisionsasphäre *Edmund Optics 67-250* zeichnet sich durch eine sehr hohe numerische Apertur von $NA = 0,83$ bei einem relativ großen Arbeitsabstand von $wd = 4,81 \text{ mm}$ aus. Mit ihrem Durchmesser von 15 mm und der freien Apertur von $13,5 \text{ mm}$ liegt sie in der Größenordnung kommerziell

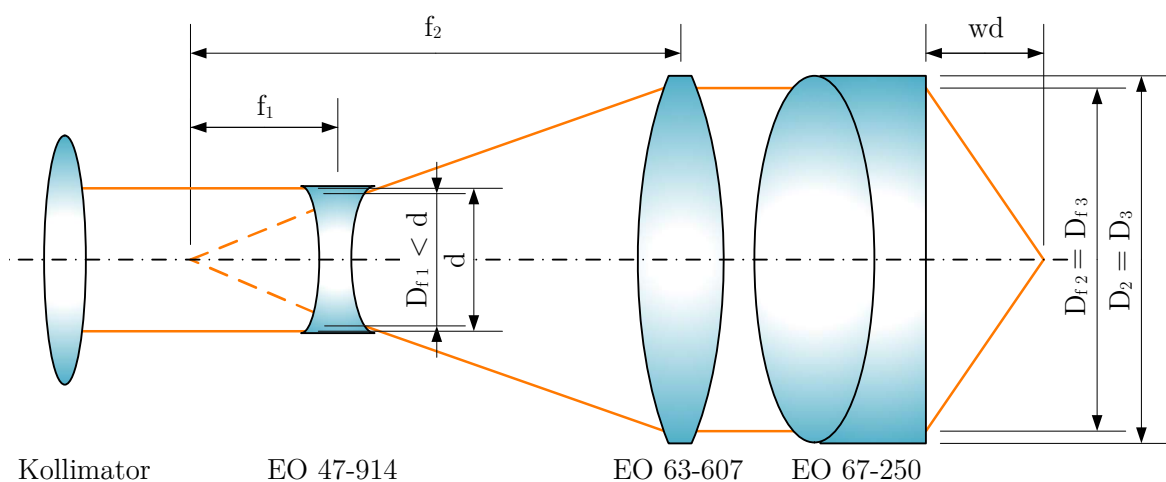


Abbildung 2.6: Geplante Linsenordnung des Objektivs:

d Strahldurchmesser	D_{f1} Freie Apertur Streulinse	f₁ Brennweite Streulinse
D₂ Durchmesser Tubuslinse	D_{f2} Freie Apertur Tubuslinse	f₂ Brennweite Tubuslinse
D₃ Durchmesser Fokuslinse	D_{f3} Freie Apertur Fokuslinse	wd Arbeitsabstand

erhältlicher Objektive. Die asphärisch geschliffene Linse besitzt den Vorteil einer geringen sphärischen Aberration im Vergleich zu herkömmlichen Linsen [61]. Damit die im Okular befindliche Streulinse den einfallenden Strahl auf den benötigten Durchmesser aufweiten kann, muss auch der Durchmesser ihrer freien Apertur geringer als der des einfallenden Strahls von $D_{f1} \leq d$ sein. Der Durchmesser des kollimierten Strahls ist durch den Fokussierkollimator vorgegeben und beträgt $d = 4 \text{ mm}$. Die Linse *Edmund Optics 47-914* erfüllt diese Anforderung und bildet in Kombination mit der Tubuslinse *Edmund Optics 63-607* eine adäquate Strahlauflösung.

2.3.4.2 Berechnung der Dispersion und der Schnittweiten

Ausgehend von einer perfekten Kollimation zwischen Tubus- und Fokuslinse, lassen sich die Schnittweiten unterschiedlicher Wellenlängen analytisch ermitteln. Die Schnittweite sw einer Linse gibt den Abstand der Brennebene zur ihrer physischen Kante für eine Designwellenlänge λ_D an. Sie ist für diese Wellenlänge also gleich dem angegebenen Arbeitsabstand der Linse ($sw(\lambda_D) = wd$). Die Berechnung der Schnittweiten anderer Wellenlängen erfordert die Kenntnis der wellenlängenabhängigen Brechzahl $n(\lambda)$, der Krümmungsradien r_1 und r_2 der fokussierenden Linse, sowie dem beschriebenen Arbeitsabstand. Für die Schnittweitendifferenz einer Einzellinse gilt [120]:

$$\Delta_{sw} = -wd^2 \cdot (n(\lambda) - n(\lambda_D)) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.1)$$

Die Bezeichnung der Variablen und der Indizes der Formel sind an die Nomenklatur dieser Arbeit angepasst. Für die Berechnung der Schnittweitendifferenz zwischen den Messwellenlängen λ_1 und λ_2 und der Designwellenlänge $\lambda_D = 587,6\text{nm}$ wird die Brechzahl der ausgewählten Fokuslinse in Abhängigkeit der Messwellenlängen benötigt [122]. Die allgemeine Form zur Approximation der wellenlängenabhängigen Brechzahl wird durch folgende Gleichung beschrieben [123, 124]:

$$n^2(\lambda) = \sum_{i=0}^k A_i \lambda^{2i} + \sum_{j=0}^l A_{j+k} \lambda^{-2j} \quad (2.2)$$

Eine Näherung kann durch die Sellmeier-Gleichung

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \quad (2.3)$$

erfolgen, wodurch nur noch sechs Koeffizienten benötigt werden [120]. Diese lassen sich den Datenblättern der Glashersteller entnehmen und sind für das Substrat der gewählten Fokuslinse (*Schott N-FS5*) in Tabelle 2.2 angegeben:

Tabelle 2.2: Sellmeier-Koeffizienten von *Schott N-FS5* (nach [125])

Koeffizient	Wert	Koeffizient	Wert
B_1	1,52481889	C_1	0,011254756
B_2	0,187085527	C_2	0,0588995392
B_3	1,42729015	C_3	129,141675

Für die vorgesehenen Wellenlängen $\lambda_1 = 0,642\text{ }\mu\text{m}$ und $\lambda_2 = 0,662\text{ }\mu\text{m}$ und die Designwellenlänge $\lambda_D = 0,5876\text{ }\mu\text{m}$ ergeben sich demnach folgende Brechzahlen:

$$n(\lambda_1) = \sqrt{1 + \frac{B_1 \lambda_1^2}{\lambda_1^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda_1^2}{\lambda_1^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda_1^2}{\lambda_1^2 - C_3}} = 1,6677, \quad (2.4)$$

$$n(\lambda_2) = \sqrt{1 + \frac{B_1 \lambda_2^2}{\lambda_2^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda_2^2}{\lambda_2^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda_2^2}{\lambda_2^2 - C_3}} = 1,6662 \text{ und} \quad (2.5)$$

$$n(\lambda_D) = \sqrt{1 + \frac{B_1 \lambda_D^2}{\lambda_D^2 - C_1} + \frac{B_2 \lambda_D^2}{\lambda_D^2 - C_2} + \frac{B_3 \lambda_D^2}{\lambda_D^2 - C_3}} = 1,6727. \quad (2.6)$$

Mit Hilfe dieser Brechzahlen, sowie der Krümmungsradien der Linse laut Datenblatt [122] lassen sich die Schnittweitendifferenzen Δ_{SW} zwischen den Messwellenlängen λ_1 bzw. λ_2 und der Designwellenlänge λ_D nach Formel 2.1 berechnen. Es ergibt sich

$$\begin{aligned}\Delta_{SW}(\lambda_1, \lambda_D) &= -(4,81 \text{ mm})^2 \cdot (1,6677 - 1,6727) \left(\frac{1}{5,731 \text{ mm}} - \lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{k} \right) \right) \\ &= -0,0202 \text{ mm}\end{aligned}\tag{2.7}$$

für die Schnittweitendifferenz zwischen λ_1 und λ_D , und

$$\begin{aligned}\Delta_{SW}(\lambda_2, \lambda_D) &= -(4,81 \text{ mm})^2 \cdot (1,6662 - 1,6727) \left(\frac{1}{5,731 \text{ mm}} - \lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{k} \right) \right) \\ &= -0,0262 \text{ mm}\end{aligned}\tag{2.8}$$

für die Schnittweitendifferenz zwischen λ_2 und λ_D . Die resultierende Schnittweitendifferenz zwischen den konfokalen Messwellenlängen beträgt demnach

$$\begin{aligned}\Delta_{SW}(\lambda_1, \lambda_2) &= \Delta_{SW}(\lambda_1, \lambda_D) - \Delta_{SW}(\lambda_2, \lambda_D) \\ &= -0,0202 \text{ mm} + 0,0262 \text{ mm} = 6 \text{ }\mu\text{m}.\end{aligned}\tag{2.9}$$

Ein Arbeitsbereich in dieser Größenordnung sollte sich ausgezeichnet für das konfokale Messsystem eignen. Der Arbeitsbereich des bisher genutzten Laserfokussensors liegt in der gleichen Größenordnung [31]. Die berechnete Linsenpaarung wird für die Umsetzung eines konstruktiven Entwurfs verwendet.

Die Rechnung hat nur die Dispersion durch die Fokuslinse berücksichtigt. Es tritt jedoch bereits Dispersion durch die Streulinse in der Strahlaufweitung auf. Dadurch können sich die Kollimationszustände der konfokalen Wellenlängen zwischen Tubus- und Fokuslinse unterschiedlich ausprägen können. Dies wurde in der Rechnung nicht berücksichtigt. Eine messtechnische Überprüfung der berechneten Schnittweitendifferenz wird in Kapitel 2.5.1 durchgeführt.

2.3.4.3 Konstruktion und Aufbau

Aufbauend auf den Berechnungen wird das Objektiv für experimentelle Untersuchungen konstruiert. Der Aufbau soll möglichst einfach gestaltet werden. Einen Ausschnitt aus dem technischen Entwurf der optischen Baugruppe zeigt Abbildung 2.7.

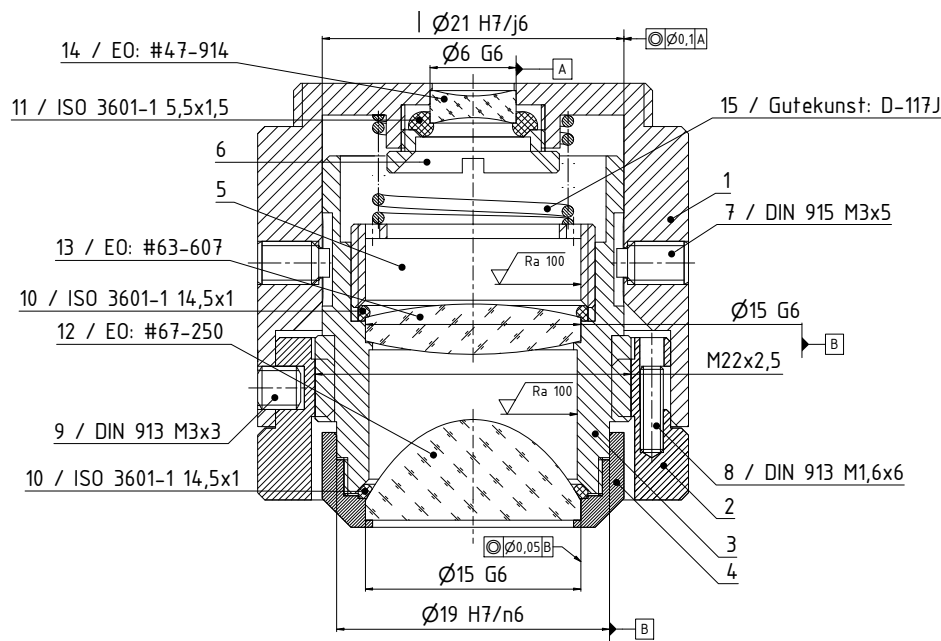


Abbildung 2.7: Schnittdarstellung des Objektivs:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1 Gehäuse | 2 Justagering |
| 3 Vorschubelement | 4 Vorschraubring der Fokuslinse |
| 5 Vorschraubring der Kollimatorlinse | 6 Vorschraubring der Streulinse |
| 7 Gewindestift mit Führungszapfen | 8 Anschlagbolzen der Verdrehssicherung |
| 9 Verdrehssicherung und Lagefixierung | 10 Druckentlastungen der großen Linsen |
| 11 Druckentlastung der Streulinse | 12 Fokuslinse EO 67-250 |
| 13 Kollimatorlinse EO 63-607 | 14 Streulinse EO 47-914 |
| 15 Feder zur Verringerung des Spiels | |

Da zwischen Kollimatorlinse (13) und Fokuslinse (12) idealerweise ein paralleler Strahlengang vorliegt, ist der Abstand der beiden Gläser zueinander weitestgehend egal. Um diese korrekte Kollimation zu ermöglichen, ist aber der exakte Abstand zwischen Kollimations- und Streulinse (14) essentiell. Dafür müssen die Brennebenen der beiden Linsen kongruent sein. Um das sicherzustellen, ist die Kollimatorlinse in einem Vorschubelement (3), gefasst. Dieses lässt sich durch das Verdrehen des Justageringes (2) translatorisch in Richtung der optischen Achse bewegen. So können die Streu- und Kollimatorlinse exakt zueinander ausgerichtet werden. Der axiale Verstellweg ist auf etwa $\pm 1,25$ mm ausgelegt, begrenzt durch einen harten Anschlag (8) nach einer Umdrehung des Justagerings.

Der Gewindestift (9) dient der Lagefixierung des Vorschubelements nach dem Justageprozess. Durch die Führungsstifte (7) wird eine Rotation der inneren Baugruppe verhindert. So wird die laterale Ausrichtung der Linsen zueinander jederzeit gleichgehalten. Die Feder (15) verringert das Gewindespiel. Die elastischen Elemente (10,11)

Abbildung 2.8: Aufbau des Objektivs: Am gerändelten Außenring kann der exakte Abstand zwischen Streu- und Kollimatorlinse eingestellt werden. Der sichtbare Gewindestift verhindert ein Verdrehen der Baugruppe. Durch anziehen des Stifts wird die Lage der Linsen zueinander fixiert.

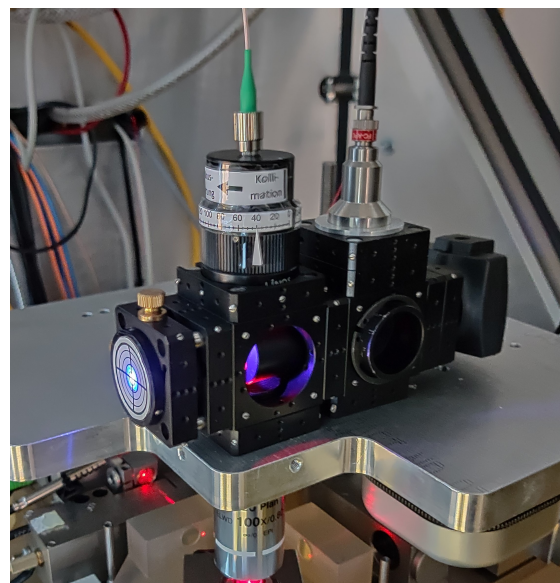


verhindern das Brechen der Linsen durch zu hohe Druckbelastungen beim Anziehen der Vorschraubringe (4, 5, 6). Zur Zentrierung der Linsen im geschlossenen Gehäuse des optischen Systems, werden Form- und Lagetoleranzen angegeben. Das nach diesem Entwurf gefertigte, montierte und justierte Objektiv ist in Abbildung 2.8 zu sehen.

2.4 Funktionsnachweis

Zur Konzeptprüfung des konfokalen Aufbaus wird die Sensorbox nach Anschlussbelegung der Abbildung 2.3 an die Verstärker- und Signalverarbeitungseinheit des Laserfokussensors, die *SIOS LFS-02*, angeschlossen. Dadurch wird der Signalaustausch mit der *Nanopositionier- und Nanomessmaschine* ermöglicht. In Abbildung 2.9 ist der an der Sensorplatte der *NPMM* befestigte Sensorkopf mit Kamera zu sehen. Der grüne Stecker ist der objektseitige Ausgang des Lichtwellenleiters, der die Laserdioden der Sensorbox mit dem Fokussierkollimator des Sensorkopfes verbindet. Der Kollimator ist

Abbildung 2.9: Sensorkopf des konfokalen Messsystems. Der Aufbau ist an der Sensorplatte der *Nanopositionier- und Nanomessmaschine* befestigt. Der grüne Stecker gehört zum Lichtwellenleiter des Messsystems und ist an den Fokussierkollimator angeschlossen.



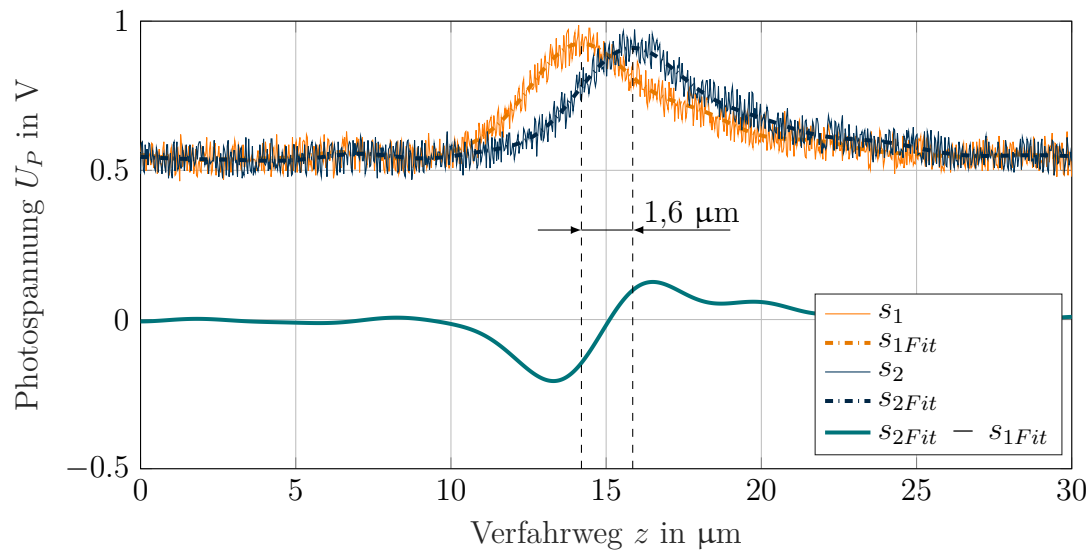


Abbildung 2.10: Funktionsnachweis des konfokalen Aufbaus mit dem *Nikon 50x*-Objektiv: Die Signale s_1 und s_2 zeigen die durch die Photodioden erzeugten Spannungsverläufe beim Durchfahren der Fokalebenen der Wellenlängen λ_1 und λ_2 . Es zeigt sich, dass die Fokalebenen der zwei Wellenlängen einen Versatz von $1,6 \mu\text{m}$ zueinander einnehmen. Das Signal-Rausch-Verhältnis der Signale ist sehr gering und bedarf einer Verbesserung. Durch die gefitteten Signale s_{1Fit} und s_{2Fit} lässt sich bereits ein Differenzsignal mit annähernd linearem Arbeitsbereich bilden. Die Konzeptprüfung ist erfolgreich.

spielfrei im *Qioptiq Mikrobanksystem* befestigt. Dadurch wird die Koaxialität zwischen Objektiv und Kollimator optimiert. Die Abbildungsfehler Astigmatismus und Koma, die sich aufgrund schräg einfallender Strahlen ausbilden, werden dadurch verringert und ein größerer Teil des reflektierten Lichtes gelangt zurück in den Lichtwellenleiter [61]. Als Prüfling dient ein Planspiegel. Zur Steuerung und Programmierung der Maschine wird *Mathworks Matlab* benutzt. Als Objektiv kommt zunächst das *Nikon CFI TU Plan EPI ELWD 50x* zum Einsatz. Bei diesem sogenannten Halbapochromaten „liegt der gemeinsame Fokus für blaues und rotes Licht schon sehr nahe dem Fokus für gelbes Licht“ [67]. Die farbkorrigierende Güte dieses Objektivs liegt dementsprechend zwischen der eines Achromaten und eines Apochromaten (vgl. Abbildung 1.13). Das Objektiv besitzt einen Arbeitsabstand von $wd = 11 \text{ mm}$ und eine numerische Apertur von $NA = 0,6$. Es wurde bisher auch in Kombination mit dem Laserfokussensors genutzt. Zur Überprüfung der Funktionalität wird die Probe mit Hilfe der *NPMM* in der Nähe der konfokalen Fokalebenen positioniert. Die Annäherung an diesen Bereich lässt sich am Lichtwellenleiter des Sensorkopfes gut beobachten. Nähert sich die Probe den Fokalebenen, so ist ein Aufleuchten der Faser zu erkennen. Sobald sich die Probe in unmittelbarer Nähe zu den sensorischen Fixpunkten befindet, wird eine Bewegung in

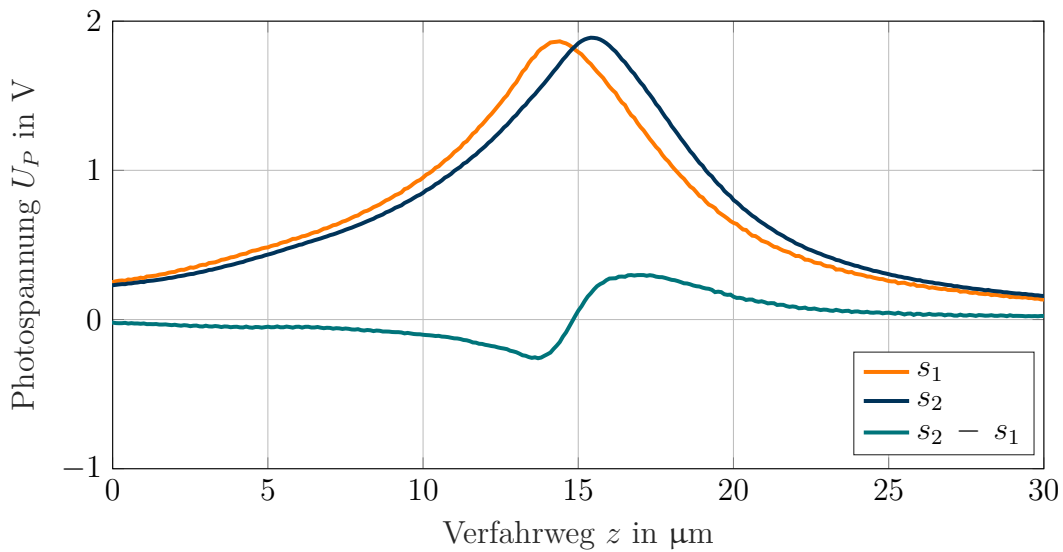


Abbildung 2.11: Verbesserung der Signalqualität: Durch korrekte Justage kann das Signal-Rausch-Verhältnis signifikant verbessert werden. Die Bildung des linearen Arbeitsbereiches ist ohne Fitten der Signale möglich.

z -Richtung initiiert, bei der die Fokalebene beider Wellenlängen durchfahren werden. Die aufgenommenen Spannungssignale s_1 und s_2 der Photodioden des konfokalen Sensors sind in Abbildung 2.10 dargestellt. Es sind zwei, um etwa $1,6 \mu\text{m}$ zueinander versetzte Signale zu sehen, die jedoch ein schlechtes SNR aufweisen. Die mit Hilfe eines gleitenden Mittelwertfilters erzeugten gefitteten Signale s_{1Fit} und s_{2Fit} eignen sich, um einen streng monotonen Arbeitsbereich im Differenzsignal zu bilden. Der Funktionsnachweis wurde somit erbracht.

Um eine hohe Auflösung erzielen zu können, muss der Aufbau korrekt justiert werden. Durch eine bessere Ausrichtung der Photodioden und die korrekte Einstellung des Fokussierkollimators ist es möglich, das Signal-Rausch-Verhältnis signifikant zu verbessern. In Abbildung 2.11 sind die Signale nach erfolgter Justage zu sehen. Ein Signalfit der Signale zur Erzeugung des Differenzsignals wird nicht mehr benötigt.

2.5 Messtechnische Untersuchungen

2.5.1 Funktionale Untersuchung der Objektive

Da die Größe des Arbeitsbereiches und somit die Funktionalität des konfokalen Sensors von der Wahl der sammelnden Optik abhängt, werden verschiedene Objektive auf ihre funktionale Kombinierbarkeit mit dem Messsystem geprüft. Zur Verfügung stehen

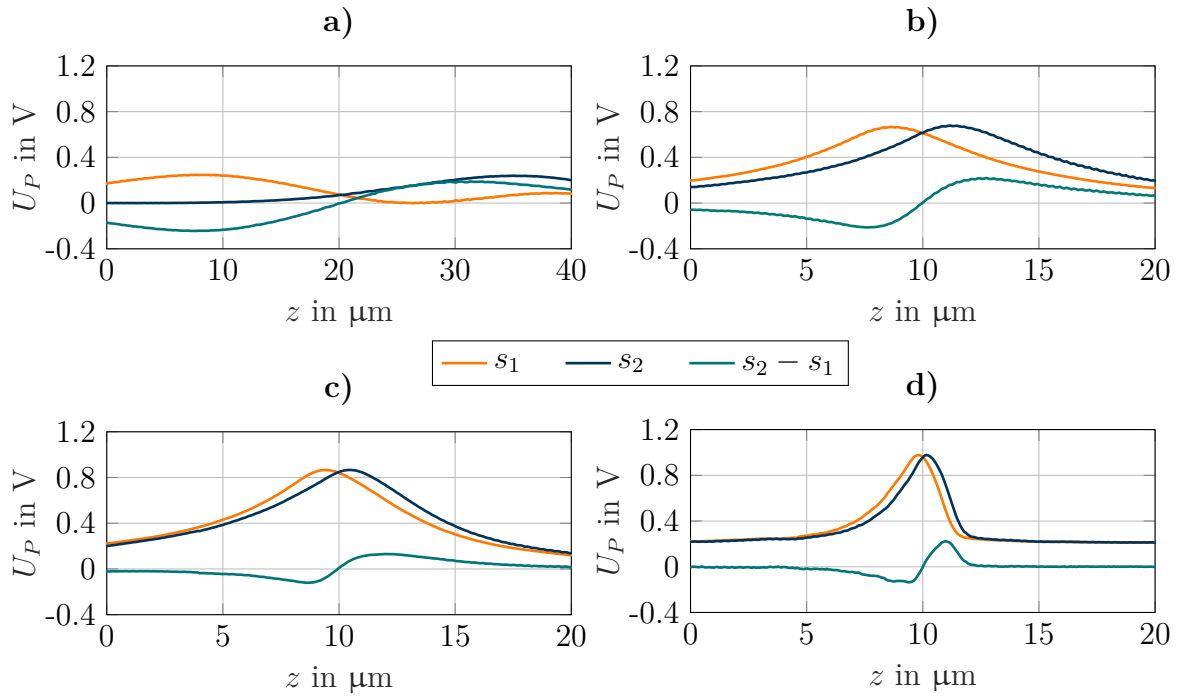


Abbildung 2.12: Signalverläufe des konfokalen Sensors in Kombination mit verschiedenen Objektiven. Die Diagramme zeigen die Ausbildung der zwei Signalpeaks in s_1 und s_2 (orange, blau) sowie das Differenzsignal $s_2 - s_1$ (grün):

a) Eigenkonstruktion

b) 40x Zeiss-Objektiv

c) 50x Nikon-Objektiv

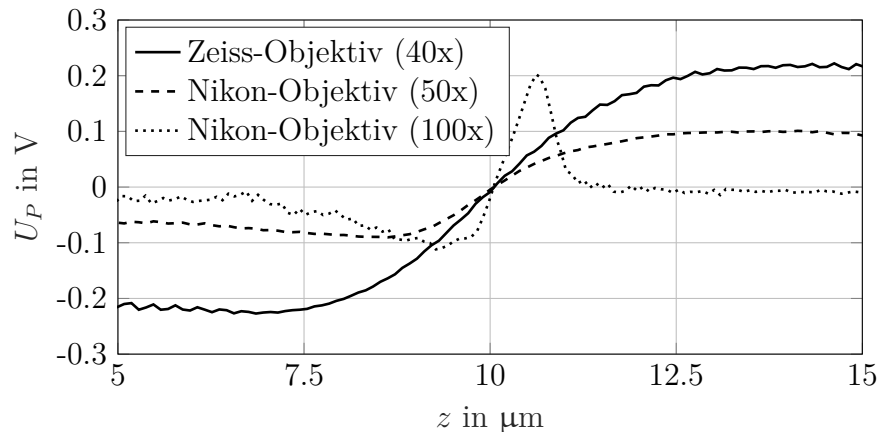
d) 100x Nikon-Objektiv

ein Zeiss-Objektiv ($\Gamma = 40x$, $NA = 0,65$), zwei Nikon Halbapochromaten ($\Gamma = 50x$, $NA = 0,6$ und $\Gamma = 100x$, $NA = 0,8$), sowie das eigenkonstruierte Objektiv ohne farbkorrigierende Elemente ($NA = 0,83$). Die Signalverläufe der konfokalen Einzelsignale s_1 und s_2 , sowie die daraus entstehenden Differenzsignale $s_2 - s_1$ sind für diese vier Objektive in Abbildung 2.12 aufgetragen.

Das eigenkonstruierte, farbkorrigierte Objektiv weist dabei eine sehr viel höhere Schnittweitendifferenz auf, als zuvor berechnet. Der durch das Differenzsignal erzeugte Arbeitsbereich beträgt etwa $25\text{ }\mu\text{m}$ anstatt der berechneten $6\text{ }\mu\text{m}$. Infolgedessen verringert sich die Sensitivität der axialen Auflösung. Die anderen getesteten Objektive weisen sehr viel bessere Signalverläufe auf. Daher wird auf weitere Untersuchungen mit dem selbstentwickelten Objektiv verzichtet.

Für eine bessere Auswertbarkeit sind die Differenzsignale der anderen Objektive in Abbildung 2.13 zusammengefasst und vergrößert dargestellt. Das Zeiss-Objektiv zeichnet sich durch einen großen linearen Bereich von $dz_{40x} = 2,8\text{ }\mu\text{m}$ aus. Jedoch ist

Abbildung 2.13: Differenzsignale der *Nikon*-Objektive und des *Zeiss*-Objektivs.



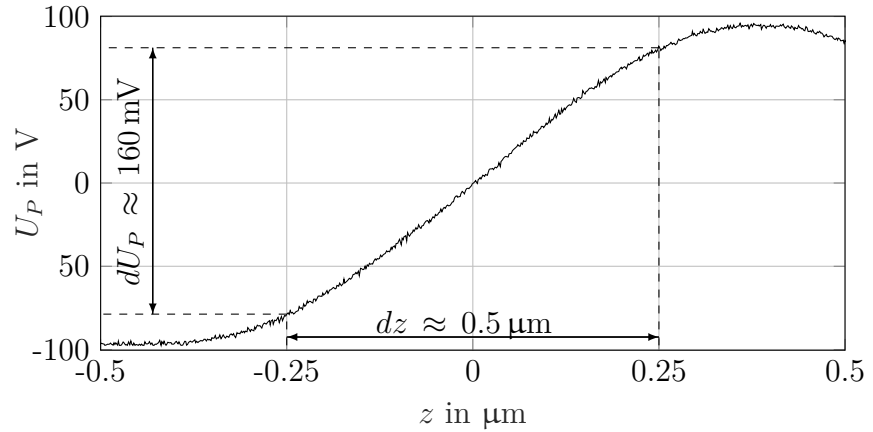
auch eine deutliche Schwingung in der Kennlinie zu erkennen. Diese Schwingung im Arbeitsbereich führt zu erhöhten Messabweichungen. Die Halbapochromaten von *Nikon* weisen im linearen Bereich eine höhere Stetigkeit auf. Es entstehen Arbeitsbereiche von $dz_{50x} = 1 \mu\text{m}$ und $dz_{100x} = 0,5 \mu\text{m}$ sowie ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis. Das Objektiv mit der Vergrößerung $\Gamma = 100\times$ erzeugt dabei einen definierteren Übergang in den linearen Bereich als die anderen Objektive. Für die geplante lithografische Anwendung wird die Verwendung eines Objektivs mit möglichst hoher numerischer Apertur angestrebt. Aus diesen Gründen wird für die weiteren messtechnischen Untersuchungen das *Nikon CFI60 TU Plan Epi ELWD 100x*-Objektiv verwendet.

2.5.2 Arbeitsbereich und axiale Auflösung

Da das Differenzsignal des *Nikon* 100x-Objektivs in Abbildung 2.13 eine schlechte Punktsymmetrie aufweist, werden für die weiteren messtechnischen Untersuchungen die Photodioden in der sensorischen Box neu justiert. Ziel ist ein annähernd punktsymmetrisches Signal. Dadurch wird die Kennlinie symmetrisch in den Nulldruchgang verlagert, wodurch der Arbeitspunkt auf die differentielle Spannung $U = 0 \text{ V}$ eingestellt werden kann.

In Abbildung 2.14 ist das Differenzsignal nach Neujustage dargestellt. Durch die Verwendung des 100 \times -Objektivs entsteht ein sehr linearer Arbeitsbereich mit einer Größe von $dz \approx 500 \text{ nm}$. In diesem Bereich liegt eine Spannungsdifferenz von $dU \approx 160 \text{ mV}$ vor. Mit Hilfe dieser Werte kann die axiale Auflösung des Systems bestimmt werden. Der digitale Signalprozessor der *NPMM* arbeitet mit einem 16-Bit Analog-Digital-Wandler (AD-Wandler). Das Differenzsignal wird in weiteren Schritten innerhalb

Abbildung 2.14: Untersuchung messtechnischer Eigenschaften anhand des linearen Bereichs des Differenzsignals. Das Signal ist durch Verwendung des 100x *Nikon*-Objektivs entstanden (vgl. Abbildung 2.13).



des digitalen Signalprozessors auf einen Signalbereich von $U_N = \pm 10 \text{ V}$ normiert (siehe dazu auch Kap. 3.1). Die Auflösung des Signalprozessors beträgt dementsprechend

$$R_{DSP} = \frac{20 \text{ V}}{2^{16} \text{ Digits}} = 0,3 \frac{\text{mV}}{\text{Digit}}. \quad (2.10)$$

Aus dem Differenzsignal lässt sich eine sensorische Auflösung berechnen. Diese beträgt

$$R_{Sensor} = \frac{0,5 \mu\text{m}}{160 \text{ mV}} = 3,125 \frac{\text{nm}}{\text{mV}}. \quad (2.11)$$

Daraus ergibt sich die Gesamtauflösung des kombinierten Systems nach

$$R_{Gesamt} = R_{DSP} \cdot R_{Sensor} = 0,9375 \frac{\text{nm}}{\text{Digit}}. \quad (2.12)$$

Die Berechnung zeigt, dass das konfokale Messsystem eine axiale Auflösung von $R_{ax} \approx 1 \text{ nm}$ erreicht.

2.5.3 Laterale Auflösung

Die laterale Auflösung des Sensors wird durch die Größe des Laserspots auf der Probe begrenzt. Im Wesentlichen wird die Spotgröße durch die optische Abbildung des Faserkerns auf dem Messobjekt berechnet. Der Faserkerndurchmesser des Lichtwellenleiters am Sensorkopf beträgt $d_K = G = 3,5 \mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 2.5). Die Brennweite des Fokussierkollimators ist mit $f_{Koll} = 20 \text{ mm}$ und die Brennweite des Objektivs mit $f_{Obj} = 2 \text{ mm}$ angegeben. Die Kombination aus Kollimator und Objektiv kann als Zwei-Linsen-System betrachtet werden. Dadurch kann die Größe des abgebildeten

Lichtflecks nach der geometrisch-optischen Abbildungsgleichung 1.8 berechnet werden. Für die Bildgröße B , die dem Durchmesser des Spots d_S entspricht, ergibt sich

$$d_S = B = \frac{G \cdot f_{Obj}}{f_{Koll}} = \frac{3,5 \mu\text{m} \cdot 2 \text{ mm}}{20 \text{ mm}} = 350 \text{ nm}. \quad (2.13)$$

Dieser Wert liegt unterhalb des idealen Strahldurchmessers, der sich aus dem Rayleigh-Kriterium K_R nach Formel 1.1 ergibt. Der Strahldurchmesser für die kritische Wellenlänge $\lambda_2 = 662 \text{ nm}$ beträgt demnach

$$d_S = 2 \cdot K_R = 2 \cdot \frac{0,61 \lambda}{NA} = 1,22 \cdot \frac{662 \text{ nm}}{0,8} = 1,01 \mu\text{m}. \quad (2.14)$$

Das Rayleigh-Kriterium ergibt sich aus dem Abstand des ersten Beugungsmaximums bis zum ersten Beugungsminimum einer punktförmigen Lichtquelle mit infinitesimal kleiner Apertur unter der Annahme eines idealen gaußförmigen Strahlprofils mit der Beugungsmaßzahl $M^2 = 1$ [76]. Es ist also das Maß für den Radius eines idealen Laserspots.

Um zu bestimmen, inwieweit dieser theoretische Wert auch praktisch erreicht wird, werden die Fokuspunktdurchmesser der Messwellenlängen experimentell überprüft. Eine

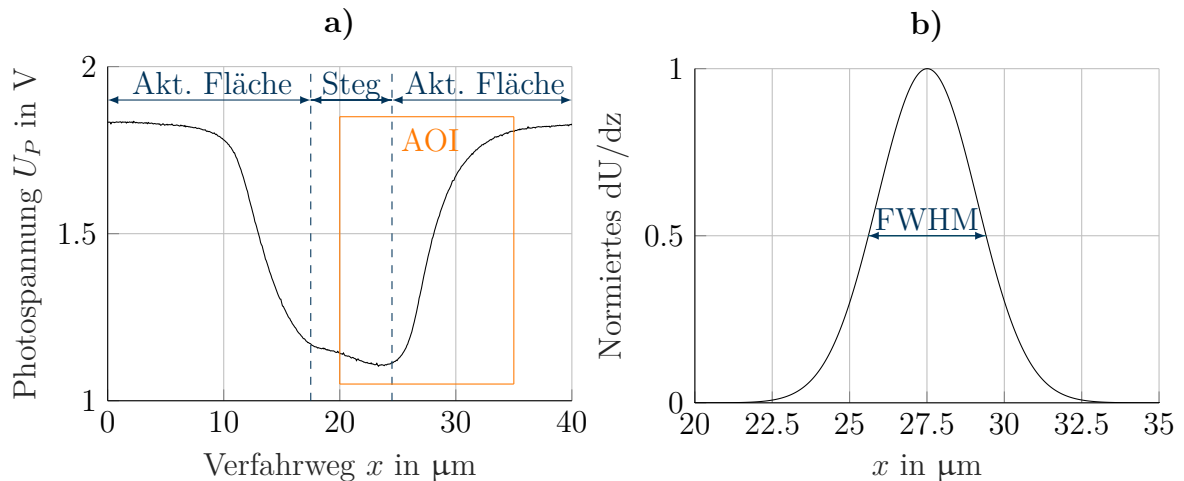


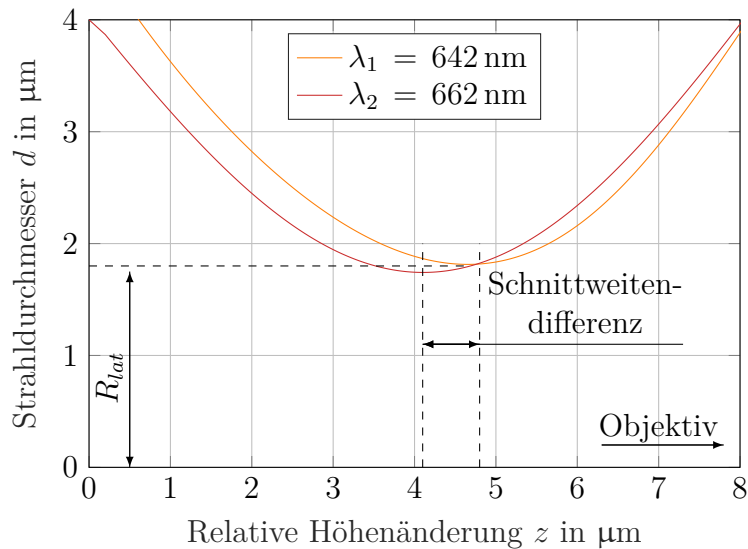
Abbildung 2.15: Auswertung der lateralen Auflösung nach [126]:

a) Signalverlauf der Photodiodespannung einer Doppeldiode beim Verschieben des Lichtflecks von der ersten aktiven Fläche über den Steg auf die nächste aktive Fläche an einer beliebigen z-Position. Eingezeichnet ist die Area of Interest (AOI) für die Signalweiterverarbeitung.

b) Normierter Graph der Ableitung dU_P/dx in der AOI. Die Halbwertsbreite (FWHM) ist ein mögliches Kriterium zur Beschreibung der lateralen Strahlausdehnung. In diesem Beispiel beträgt der Strahldurchmesser etwa $d \approx 3,8 \mu\text{m}$

Methodik zur messtechnischen Bestimmung des Fokuspunktdurchmessers wird in [126] vorgestellt. Eine Photodiode mit scharfem Kantenübergang zur aktiven Fläche dient dafür als Messmittel. Idealerweise werden für diese Anwendung Doppeldioden verwendet, bei denen ein schmaler Steg die aktiven Flächen voneinander trennt. In dem Versuch werden Objektiv und Photodiode lateral zueinander verschoben, wobei der abgebildete Lichtfleck des Lasers über den Kantenübergang auf die aktive Fläche bewegt wird. Dabei wird in aufeinanderfolgenden Messungen der axiale Abstand zwischen Objektiv und Photodiode leicht verändert. Je näher die Photodiode der Fokalebene des Lasers kommt, desto steiler wird der jeweilige Anstieg des Intensitätsverlaufs eines jeden Scans. Anhand des Anstiegs lässt sich das Strahlprofil ableiten. Die Verarbeitung des Signals ist beispielhaft anhand einer Messung in Abbildung 2.15 dargestellt. Abbildung a) zeigt das Spannungssignal der Photodiode. Der für die Weiterverarbeitung interessante Bereich (Area of Interest (AOI)) ist in der Abbildung markiert. In diesem Bereich wird das Spannungssignal U_P nach dem Verfahrensweg x abgeleitet. Die Ableitung dU_P/dx wird in Abbildung b) gezeigt. Das gaußförmige Signal entspricht annähernd dem Strahlprofil des Lasers. Die Halbwertsbreite (engl. Full Width at Half Maximum (FWHM)) kann als Kriterium für die Strahlbreite, im Idealfall für den Strahldurchmesser, angenommen werden. Durch die Anwendung dieser Methodik in stetigen Abständen entlang der optischen Achse, wird in der Fokalebene der resultierende Strahldurchmesser ermittelt. In Abbildung 2.16 ist dieses Verfahren für die Wellenlängen λ_1 und λ_2 durchgeführt worden. Es ist abzulesen, dass der minimale Durchmesser des konvergenten Laserstrahls $d_{min} = d_S = 1,8 \mu\text{m}$ beträgt. Die signifikante Abweichung vom theoretischen Wert

Abbildung 2.16: Experimentelle Ermittlung der lateralen Auflösung des konfokalen Systems. Aus dem Diagramm lassen sich sowohl die Strahldurchmesser als auch die Schnittweitedifferenz der Messwellenlängen λ_1 und λ_2 ablesen.



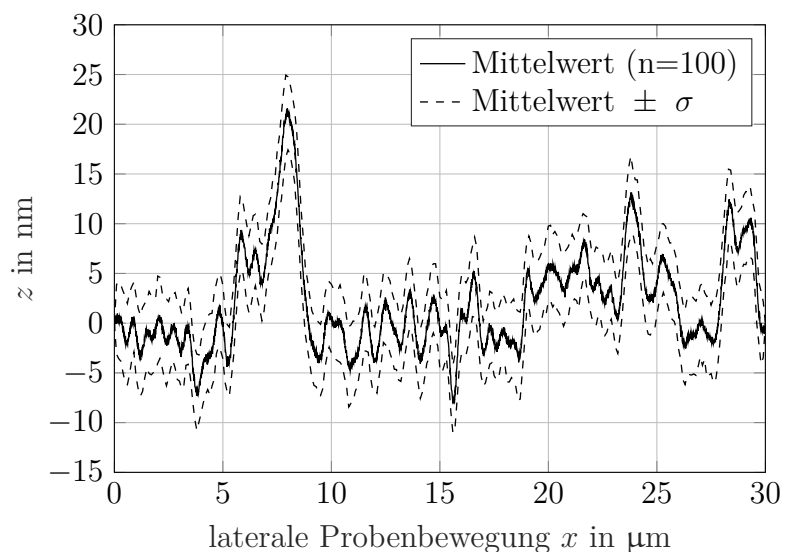
aus Gleichung 2.14 kann phänomenologisch begründet werden. Die für die Berechnung geltenden idealen Annahmen einer unendlich kleinen Apertur und einer Beugungsmaßzahl von $M^2 = 1$, können in realen Systemen nicht getroffen werden. Dies führt grundsätzlich zu einer Vergrößerung des Fokuspunktdurchmessers. Es ist auch nicht sicher, ob die Apertur des verwendeten Objektivs vollständig ausgeleuchtet wird. Schon bei kleinen Abweichungen führt dies zu einer Verringerung der numerischen Apertur, was wiederum zu einer Vergrößerung des Strahlquerschnitts führt.

Aus Abbildung 2.16 lassen sich darüber hinaus auch die Schnittweitendifferenz der Messlaser und der resultierende Arbeitsbereich von $dz \approx 0,5 \mu\text{m}$ ablesen und bestätigen. Das experimentelle Vorgehen nach [126] eignet sich daher sowohl zur Bestimmung der lateralen als auch der axialen Auflösung des konfokalen Systems.

2.5.4 Wiederholpräzision

Die Wiederholpräzision gibt die Standardabweichung der Messwerte an. Diese ist ein Maß für die Präzision der Sensor-Maschinen-Kombination [127, 128]. Für diese Messung wird ein Planspiegel als Prüfling genutzt. Dieser wird durch die *NPM* über eine Strecke von $x = 30 \mu\text{m}$ unter dem Objektiv des Sensors hinweg bewegt. Um statistisch gesicherte Aussagen treffen zu können, wird die Messung 100 mal wiederholt. Aus den Messdaten wird anschließend der Mittelwert, sowie die Standardabweichung der Messreihe gebildet. In Abbildung 2.17 sind die ermittelten Werte abgebildet. Die maximale Standardabweichung der Messreihe beträgt ungefähr $\sigma = 5 \text{ nm}$.

Abbildung 2.17: Wiederholt gemessenes Profil eines Spiegels: Die Messung des gleichen Abschnittes wurde 100 mal durchgeführt. Dadurch kann eine statistisch gesicherte Aussage zur Wiederholpräzision des Systems getroffen werden.



2.5.5 Experimentelle Verifizierung der sensorischen Funktionalität

Unter Verifizierung versteht man in der Metrologie die Erbringung eines objektiven Nachweises, dass ein bestimmter Gegenstand, hier der konfokale Sensor, spezifizierte Anforderungen erfüllt [129]. Anhand einer definierten Stufe, die im *Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien* in Ilmenau auf Silizium aufgetragen wurde, soll dieser Nachweis erbracht werden. Die Stufenhöhe hat einen Sollwert von $h_S = 200$ nm. Die Siliziumprobe wird in den Messbereich der *NPM* gelegt. Anschließend wird der Sensor in Abhängigkeit der Probenreflektivität kalibriert. Ein Skript zur Ansteuerung der Maschine erzeugt eine mäanderförmige Bewegung des Probenbrettes unter dem Objektiv des Sensors hinweg. Das Mäander besteht aus 20 äquidistanten Messlinien über einen Bereich von $x = 5$ μm . Die Länge einer Linie beträgt dabei $l_y = 100$ μm und beinhaltet die Stufenübergänge. In Abbildung 2.18 finden sich zwei Darstellungen

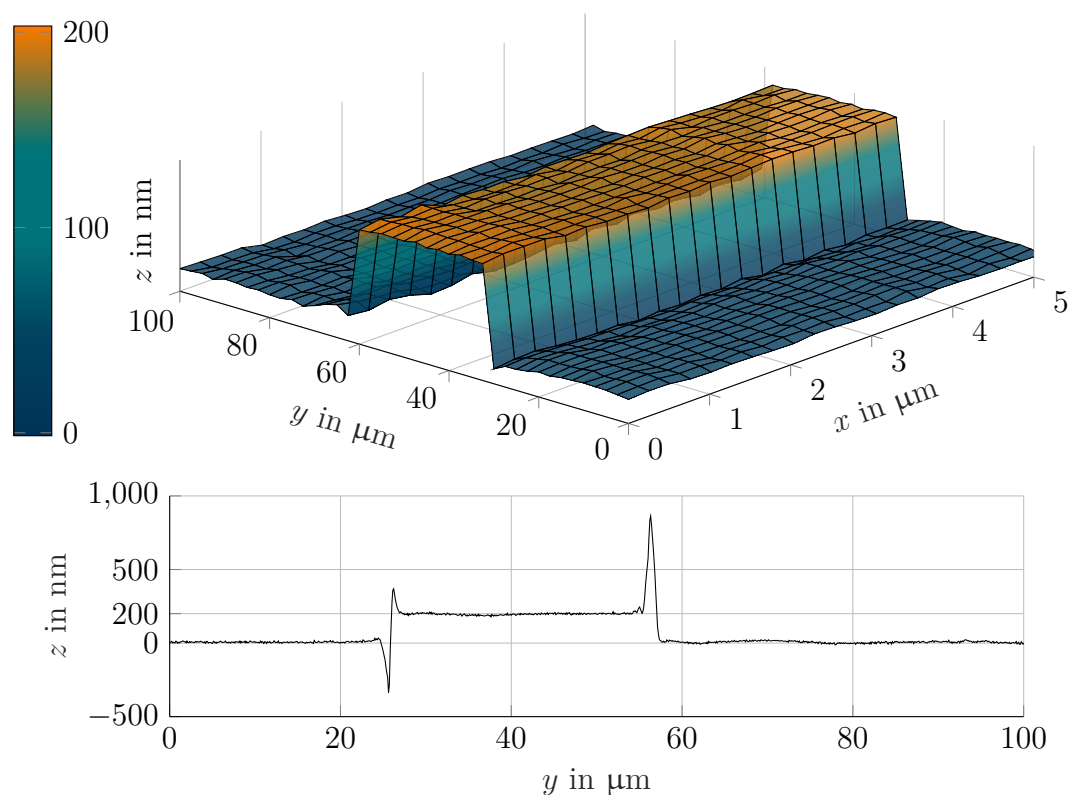


Abbildung 2.18: Messung einer definierten Stufenhöhe:

oben: Dreidimensionale und gefilterte Darstellung der Stufenhöhe. Für die Darstellung sind äquidistante Messungen in einem Bereich von $x = 5$ μm durchgeführt worden. Das Übersprechen an den Kantenübergängen wurde hier gefiltert.

unten: Zweidimensionale, ungefilterte Darstellung einer Messung. Das Übersprechen an den Kantenübergängen ist gut zu erkennen. Der Soll-Wert der Stufenhöhe beträgt $z_{\text{Soll}} = 200$ nm. Dieser Wert wird durch das konfokale Messsystem bestätigt.

der Stufenmessung. Die Messreihe bestätigt den Soll-Wert der Stufenhöhe. Dies spricht für ein adäquates Arbeiten des Sensor-Maschinen-Systems und verifiziert dieses. Das Übersprechen an den Kanten (Abbildung 2.18, unten) wird als *batwings*-Artefakt bezeichnet [130]. Dieses Merkmal entsteht aufgrund von Beugungseffekten bei scharfen Kantenübergängen an Stufen, deren Höhe h_S kleiner als die Wellenlänge des Messlasers ist ($h < \lambda_{1,2}$) [31].

2.5.6 Zusammenfassung der messtechnischen Eigenschaften

Die messtechnischen Eigenschaften des konfokalen Sensors in Kombination mit der *Nanopositionier- und Nanomessmaschine* werden in Tabelle 2.3 noch einmal zusammengefasst. Diese Werte gelten unter Nutzung des $100\times$ *Nikon*-Objektivs. Für die Verwendung anderer Objektive ist die Untersuchung der messtechnischen Eigenschaften nach Kapitel 2.5.2 - 2.5.4 zu empfehlen. Die Messgeschwindigkeit v_m ergibt sich aus empirisch ermittelten Werten an unterschiedlichen Probekörpern. Die maximale Geschwindigkeit $v_m = 5 \text{ mm/s}$ wird auf planen, gut reflektierenden Proben mit hoher Oberflächenqualität erreicht. Auf gekrümmten Oberflächen hingegen kann der Sensor nur mit einer Geschwindigkeit von $v_m \leq 100 \text{ }\mu\text{m/s}$ betrieben werden.

Tabelle 2.3: Messtechnische Eigenschaften des konfokalen Sensors in der *NPMM*. Verwendetes Objektiv: *Nikon* CFI60 TU Plan EPI ELWD 100x. (vgl. dazu auch Tabelle 1.1)

Eigenschaft	Wert
Axiale Auflösung R_{ax}	1 nm
Laterale Auflösung R_{lat}	$< 2 \text{ }\mu\text{m}$
Standardabweichung σ	5 nm
Messgeschwindigkeit v_m	$\leq 5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

Optische Messabweichungen auf geneigten Oberflächen

Der konfokale Sensore zeigt auf ebenen Probenoberflächen hervorragende messtechnische Eigenschaften. Ist die Oberfläche geneigt oder gekrümmt, können Messabweichungen entstehen, die sich bis in den Mikrometerbereich erstrecken können [91, 131, 132]. Diese werden im Folgenden als oberflächenwinkelabhängige Messabweichungen bezeichnet und näher untersucht.

3.1 Ursache der Messabweichung

Die optischen Nullpunktsensoren der *NPMM* werden, bevor sie messtechnischen Einsatz finden, kalibriert. Das ist nötig, um die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften verschiedener Proben und Materialien und Intensitätsschwankungen des Sensors zu kompensieren [31]. Dafür wird das Fokusfehlersignal (engl.: focus error signal (FES)) verwendet. Es ist definiert als der Quotient aus Differenzsignal (DIF) und Summensignal (SUM) der Einzelsignale [133, 134]:

$$FES = \frac{DIF}{SUM} = \frac{s_2 - s_1}{s_2 + s_1} \quad (3.1)$$

Das Fokusfehlersignal wird im Kalibrierprozess auf den nutzbaren linearen Bereich zur Regelung begrenzt. Die Funktionswerte der dimensionslosen Kennlinie werden auf den

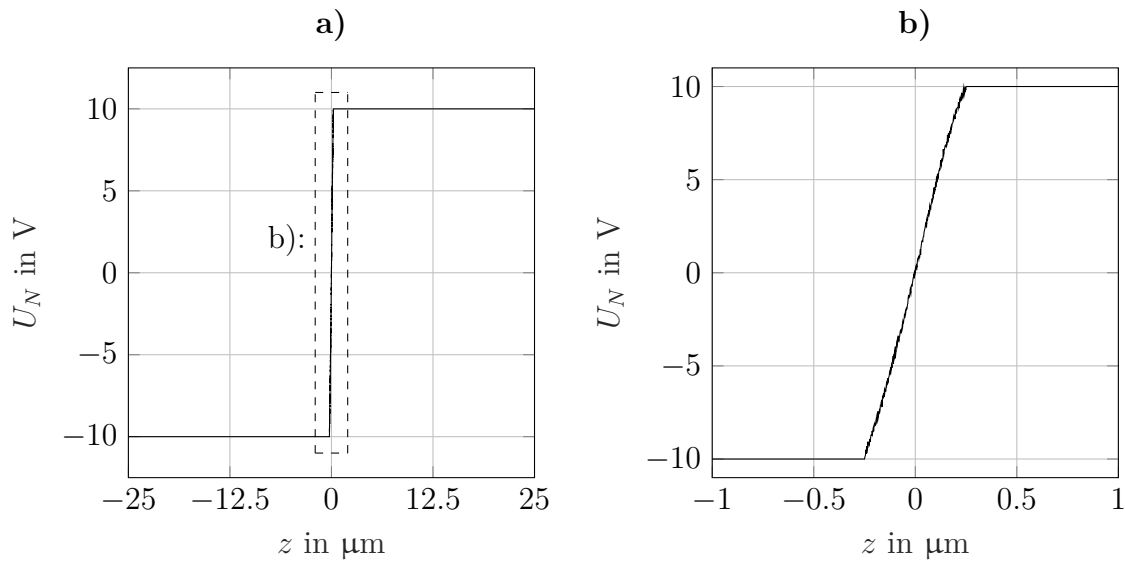


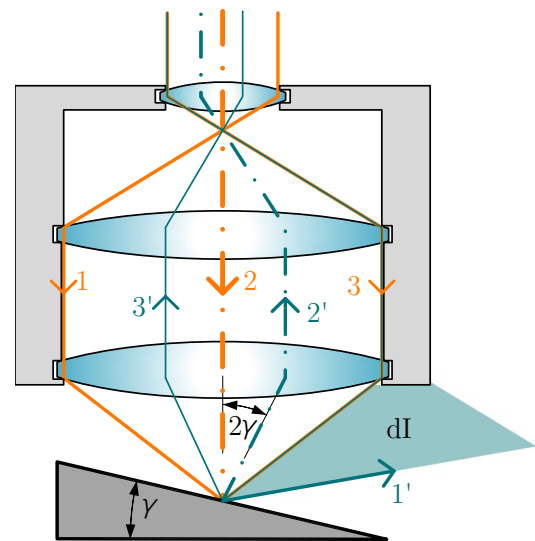
Abbildung 3.1: Normiertes Fokusfehlersignal zur Kompensation von Intensitätsschwankungen und unterschiedlichen Reflexionseigenschaften.

a) Der normierte Kennlinienverlauf über einen Bereich von $\pm 25 \mu\text{m}$ ermöglicht auch Messungen von Kantenübergängen, die wesentlich größer als der Arbeitsbereich des Sensors sind.
 b) Der Arbeitsbereich der Kennlinie erstreckt sich auf $\pm 0,25 \mu\text{m}$ bei einer hohen Linearität. Die gute Qualität der Kennlinie entsteht unter Verwendung des *Nikon* 100x-Objektives.

auswertbaren Spannungsbereich des AD-Wandlers $U_N = \pm 10 \text{ V}$ normiert (vgl. Kap. 2.5.2). Abbildung 3.1 zeigt das aufgenommene und normierte Fokusfehlersignal unter Verwendung des *Nikon* 100x-Objektives. Alle Werte unterhalb des Arbeitsbereiches werden auf den konstanten Wert $U_N = -10 \text{ V}$, alle Werte darüber auf $U_N = +10 \text{ V}$ gesetzt. Das führt zu einer Eindeutigkeit der Kennlinie, auch außerhalb des linearen Arbeitsbereiches. So kann der Positionierregler den Arbeitsbereich wieder finden, auch dann wenn aufgrund von Verschmutzungen, hohen Kantenübergängen oder tiefen Kratzern auf der Probe das Messsignal den bijektiven Arbeitsbereich temporär verlässt. Auf einer konstant geneigten Oberfläche kann ebenfalls eine Fokusfehlerkennlinie bestimmt werden. Aufgrund des geringeren in das Objektiv reflektierten Lichtanteils führt die Oberflächenneigung zu einer verringerten Sensitivität der Kennlinie, deren Zusammenhänge sich aber bei gleichbleibendem Oberflächenwinkel nicht ändern. In Abbildung 3.2 sind die geometrischen Zusammenhänge zwischen Oberflächenwinkel und reflektierter Strahlung in einem Objektiv anhand eines vereinfachten Drei-Linsen-Systems dargestellt. Trifft ein Messstrahl (orange) unter dem Winkel γ auf eine Oberfläche, so wird die optische Achse des reflektierten Strahls (grün) um den Winkel 2γ ausgelenkt. Das führt zu einer Intensitätsdifferenz dI des reflektierten Lichts, verglichen mit einer orthogonal zum Sensorkopf ausgerichteten Probe. Diese Intensitätsdifferenz wird durch

Abbildung 3.2: Strahlengang durch ein Dreilinsen-System auf eine geneigte Probe: Die optische Achse des reflektierten Strahls verlagert sich um den doppelten Oberflächenwinkel γ . Dadurch wird nur ein Teil des reflektierten Lichts vom Objektiv wieder eingefangen.

Orange	Einfallende Strahlen
Grün	Reflektierte Strahlen
Strichpunkt-Linie	Optische Achse
Durchgezogene Linie	Randstrahlen



die Kalibrierung kompensiert. Der Anstieg der Kennlinie ändert sich auf dieser konstant geneigten Probe nicht. Der Abbildung ist aber auch zu entnehmen, dass sich der Lichtanteil dI mit zunehmendem oder verringerndem Oberflächenwinkel ändert. Messungen auf Proben ohne konstanten Oberflächenwinkel führen somit zu schwankenden Intensitätswerten auf den Photodioden, die durch die Kalibrierung nicht mehr kompensiert werden. Die Steuerung der *Nanopositionier- und Nanomessmaschine* versucht dann die Signalschwankung auszugleichen, indem es der kalibrierten Fokusfehlerkennlinie folgt und die Probe fälschlicherweise näher an den Sensorkopf heran führt (vgl. Abb. 3.1 b)). Diese Fehlinterpretation führt zu der oberflächenwinkelabhängigen Messabweichung.

3.2 Ansätze zur Fehlerkompensation

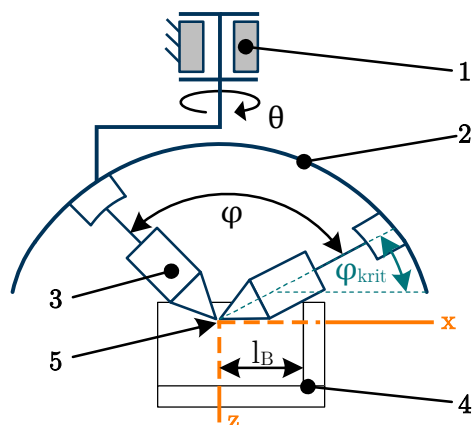
Die Größe der Messabweichung wird neben dem Einfluss des Oberflächenwinkels auch durch die Größe des Arbeitsbereichs, der Funktionsweise des optischen Sensors und den Eigenschaften des Objektivs, sowie dem Reflexionsgrad der Probe ρ bestimmt [132]. Letzterer ändert sich ebenfalls in Abhängigkeit des Einfallswinkels des Lichts und kann z. B. nach den Fresnelschen Formeln berechnet werden [135]. Die Komplexität der oberflächenwinkelabhängigen Messabweichung erschwert die hinreichend exakte Modellierung eines mathematischen Ansatzes. Darüber hinaus existieren jedoch zwei aussichtsreiche Ideen, mit Hilfe derer die Messabweichung verringert werden kann. Im ersten Ansatz soll die Messabweichung durch konstruktive Maßnahmen kompensiert, im zweiten Ansatz durch empirische Versuchsreihen ermittelt und den Messwerten gegengerechnet werden.

3.2.1 Konstruktiv: Mitneigen des Sensorkopfes

Im Rahmen des Graduiertenkollegs *NanoFab* ist ein aufrüstbares Sensorrotationssystem für die *Nanopositionier- und Nanomessmaschine* entwickelt worden, welches die Maschine um zwei Rotationsachsen erweitert [136]. Das Prinzipbild des Systems ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Diese Einheit, bestehend aus einem Drehtisch (θ) und einem damit kombinierten Goniometer (φ), ermöglicht eine definierte und präzise Drehung der Sensoren bzw. des Bearbeitungstools, um den Abbepunkt als rotatorisches Zentrum [137, 138]. Die Kinematik des Rotationssystems ermöglicht einen ansteuerbaren Azimutwinkelbereich von $\varphi = 0^\circ - 90^\circ$ und einen Polarwinkelbereich von $\theta = 0^\circ - 360^\circ$ [139]. Damit wird ein Großteil aller Winkellagen der über dem Arbeitsraum liegenden Hemisphäre adressiert. Dieses Konzept ermöglicht das sensorische System jederzeit orthogonal zur Probenoberfläche auszurichten und so der Bildung der oberflächenwinkelabhängigen Messabweichung entgegenzuwirken.

Abbildung 3.3: Prinzipbild des Rotationssystems (nach [139]).

- 1 Drehtisch
- 2 Goniometer
- 3 Sensor
- 4 Spiegelecke
- 5 Abbepunkt



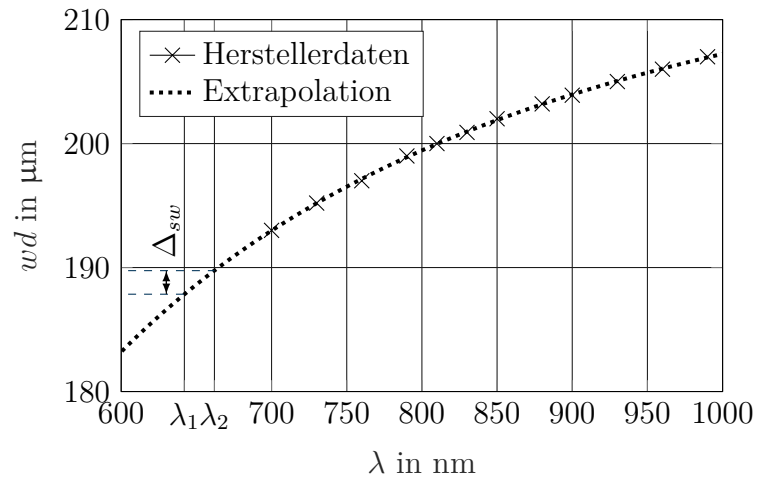
Der derzeitige Prototyp des Rotationssystems ermöglicht entlang der optischen Messachse jedoch nur einen sehr begrenzten Bauraum von $l_B = 24,5 \text{ mm}$ [140]. In Abbildung 3.3 ist zu erkennen, dass diese Bauraumbegrenzung erforderlich ist, um eine Kollision mit der Spiegelecke in kritischen Winkelstellungen φ_{krit} zu vermeiden. Um den Bereich des Azimutwinkels φ völlig ausnutzen zu können, werden Sensorköpfe mit einer Länge $l \leq l_B$ benötigt. Der konfokale Sensorkopf eignet sich aufgrund seiner Faserkoppelung zur konstruktiven Verkleinerung seiner Abmaße. Daher wird im Folgenden die Möglichkeit der Miniaturisierung des Sensorkopfes genauer untersucht.

3.2.1.1 Miniaturisierung des Sensorkopfes

Für die Realisierung eines derartigen Sensorkopfes bietet sich die Verwendung ein Gradienten-Index-Objektiv (GRIN-Objektiv) der Firma *Grintech* an. Das Objektiv mit der Herstellerbezeichnung *GT-MO-080-0415-810* ist mit seiner Baulänge von $l_O = 3,9 \text{ mm}$ ideal für sensorische Miniaturisierungszwecke geeignet und verfügt über eine objektseitige numerische Apertur von $NA = 0,8$ und einen objektseitigen Arbeitsabstand von $wd_O = 200 \text{ }\mu\text{m}$ in Wasser. An Luft entspricht das nach Formel 1.6 ungefähr einem Wert von $NA \approx 0,6$. Das Objektiv eignet sich für das konfokale Messsystem in besonderer Weise, da es nicht farbkorrigiert ist. Daher ist davon auszugehen, dass es eine ausreichende chromatische Aberration für den konfokalen Aufbau aufweist. Extrapoliert man die Werte der chromatischen Aberration des Herstellerdatenblattes, entsteht zwischen den Messwellenlängen λ_1 und λ_2 eine Schnittweitendifferenz Δ_{sw} und somit ein Arbeitsbereich von $d_z \approx 1,9 \text{ }\mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 3.4).

GRIN-Linsen besitzen entlang ihrer optischen Achse einen Brechzahlgradienten der dazu führt, dass der einfallende Lichtstrahl stetig bogenförmig gebrochen wird. Anders als herkömmlichen Linsen, arbeiten GRIN-Linsen bildseitig nicht kollimierend. Laut Datenblatt wird für eine exakte Funktion des Objektivs in einem bildseitigen Arbeitsabstand von $wd_B = 100 \text{ }\mu\text{m}$ ein fokussierter Strahl mit der numerischen Apertur $NA_B = 0,415$ benötigt. Das optische Design des verkleinerten Sensorkopfes wird so ausgelegt, dass das aus dem Lichtwellenleiter austretende Licht durch ein zusätzliches Linsensystem auf die bildseitig geforderte NA des Objektivs angepasst wird (vgl. Abb. 3.5). Die numerische Apertur des Lichtwellenleiters beträgt $NA_{LWL} = 0,121$. Der Lichtwellenleiter besitzt einen minimalen Biegeradius von $r_B = 13 \text{ mm}$. Um im ersten Entwurf Justagestellen

Abbildung 3.4: Extrapolierter Verlauf der chromatischen Aberration nach Herstellerangaben



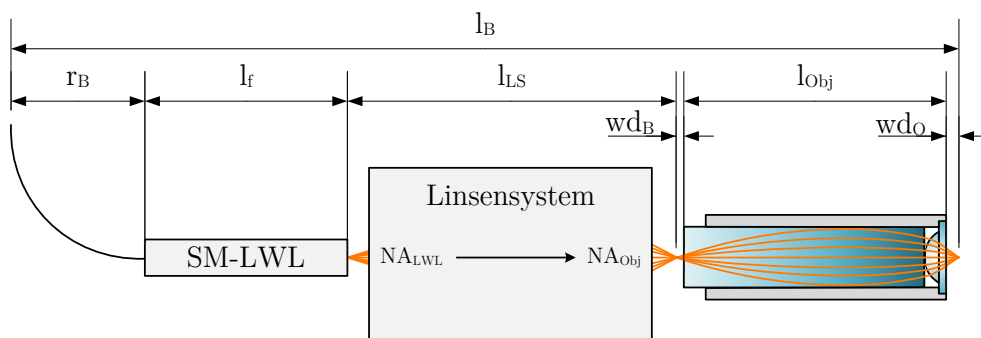


Abbildung 3.5: Schema des miniaturisierten Sensorkopfes.

$$l_B \leq 24,5 \text{ mm}$$

$$l_{LS} \text{ Bauraum Linsensystem}$$

$$wd_O = 0,2 \text{ mm}$$

$$r_B = 13 \text{ mm}$$

$$wd_B = 0,1 \text{ mm}$$

$$NA_{LWL} = 0,121$$

$$l_f \text{ freie Länge zur Montage}$$

$$l_{Obj} = 3,9 \text{ mm}$$

$$NA_{Obj} = 0,415$$

zu vermeiden, wird der Aufbau ohne strahlumlenkende Komponenten, also in einer mechanischen Achse, geplant. Es muss außerdem eine freie Länge l_f berücksichtigt werden, die für die Montage des LWL am Sensorkopf benötigt wird. Summiert man die bereits bekannten Maße aus Abbildung 3.5, so resultiert eine restlich verfügbare Baulänge von $l_f + l_{LS} \leq 7,3 \text{ mm}$ zur Anpassung der numerischen Apertur und zum Fassen des Lichtwellenleiters.

Auf Grundlage des umfangreichen Linsenkataloges der Firma *Edmund Optics* konnte eine Paarung gefunden werden, die die erforderlichen Ansprüche am ehesten erfüllt. Die Linsenkombination besteht aus der Asphäre *EO 83-546* mit einer numerischen Apertur $NA = 0,15$ und der Konvexlinse *EO 65-302* mit einer numerischen Apertur $NA = 0,42$. Die Linsen verfügen über eine sehr geringe Mittendicke. Jedoch wird aufgrund ihrer Brennweiten der zur Verfügung stehende Bauraum bereits um $1,5 \text{ mm}$ überschritten. Dabei ist noch keine Montagelänge des Lichtwellenleiters berücksichtigt.

Eine höhere Flexibilität in der Auslegung des optischen Systems bieten Kugellinsen. Diese haben den Vorteil, dass ihre optische Hauptebene H immer mittig im Glas sitzt ($H = \frac{D}{2}$). Darüber hinaus werden sie häufig zur Einkopplung von Licht in LWL genutzt, da ihre optische Charakteristik vollständig über den Durchmesser D und die Brechzahl n beschrieben sind [141]. Außerdem sind Kugellinsen bereits ab einer Größe von $D = 300 \mu\text{m}$ erhältlich und bieten somit großes Potential für Miniaturisierungsanwendungen. Für die Brennweite einer Kugellinse gilt nach [141]

$$f_{KL} = \frac{n D}{4(n - 1)}. \quad (3.2)$$

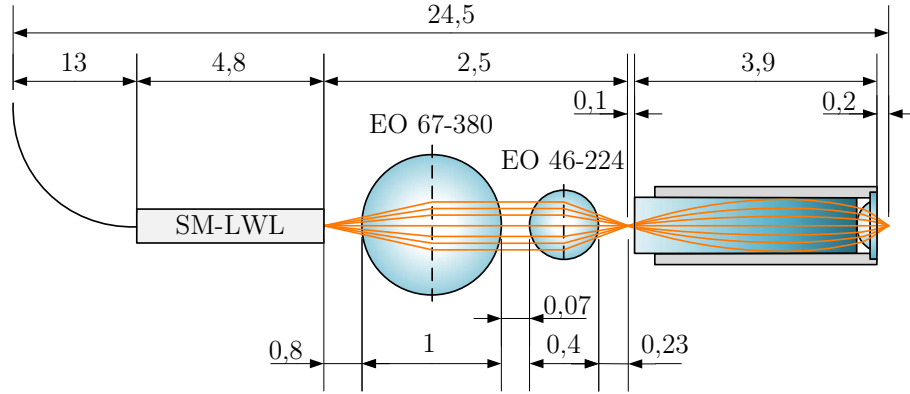


Abbildung 3.6: Konkretisierter schematischer Aufbau des miniaturisierten Sensorkopfes.

Daraus ergibt sich ein resultierender Arbeitsabstand von

$$wd = f_{KL} - \frac{D}{2}. \quad (3.3)$$

Die numerische Apertur einer Kugellinse ergibt sich nach [142] in Abhängigkeit des Kugeldurchmessers D und des Durchmessers des einfallenden kollimierten Strahls d zu

$$NA = \frac{2d(n-1)}{nD}. \quad (3.4)$$

Unter Beachtung dieser mathematischen Zusammenhänge können verschiedene Kugellinsenkombinationen zur Anpassung der numerischen Apertur zwischen Lichtwellenleiter und GRIN-Objektiv in Abhängigkeit ihrer Durchmesser D und ihrer Brechzahlen n numerisch gefunden werden. Infolge der geometrischen Beschränkungen fiel die Wahl auf eine Kugelpaarung nach Abbildung 3.6.

Die Kugellinse die an den LWL anschließt, besteht aus Quarzglas und hat eine Brechzahl von $n_1 = 1,458$. Nach Formel 3.3 besitzt sie einen Arbeitsabstand von $wd_1 = 0,8$ mm. Durch Umstellen von Formel 3.4 und Einsetzen von NA_{LWL} resultiert hinter der ersten Kugellinse ein kollimierter Strahldurchmesser von $d = 0,19$ mm. Die zweite Kugellinse besitzt eine Brechzahl von $n_2 = 1,77$ (Al_2O_3). Aus den Werten ergibt sich ein Arbeitsabstand von $wd_2 = 0,23$ mm und eine numerische Apertur von $NA_2 = 0,419$ vor dem GRIN-Objektiv. Eine exaktere Annäherung an den geforderten Wert von $NA_B = 0,415$ ist nicht nötig. Die Länge des optischen Systems l_{LS} ergibt sich aus den Durchmessern der Kugellinsen und ihrer Arbeitsabstände zu

$$l_{LS} = D_1 + wd_1 + D_2 + wd_2 = 2,43 \text{ mm}. \quad (3.5)$$

Die Verwendung von Kugellinsen in optischen Systemen führt zu erhöhten sphärischen Aberrationen. Um den Abbildungsfehler möglichst gering zu halten, sollte daher nur ein achsnaher Teil der Kugellinse der Linse ausgeleuchtet werden. Das wird hier durch das große Verhältnis von Kugel- zu Strahldurchmesser gewährleistet.

Damit die Kugeln sich nicht berühren, wird konstruktiv ein kleiner Abstand von 0,07 mm vorgesehen. Der verbleibende Bauraum von 4,8 mm wird zur Befestigung des Lichtwellenleiters genutzt. Eine erste technische Konstruktion ist entworfen und gefertigt worden. Erste Versuche zur Ermittlung eines konfokalen Arbeitsbereiches unter Verwendung des miniaturisierten Sensorkopfes zeigen, dass die sensorischen Signale s_1 und s_2 zu finden sind (vgl. Kap. 2.4). Diese unterliegen im aktuellen Entwicklungsstadium jedoch einem sehr schlechten SNR. Ein Einsatz im Sensorrotationssystem war bislang nicht möglich.

3.2.2 Empirisch: Ermittlung der Messabweichung

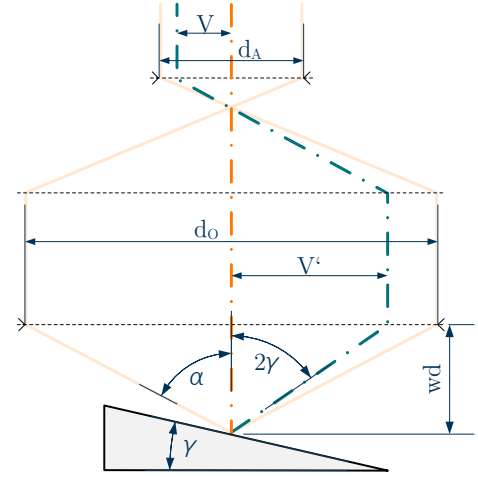
Die oberflächenwinkelabhängige Messabweichung eines optischen Sensors ist nicht direkt messbar. Zur Bestimmung dieser Abweichung werden in einem zweiten Ansatz optische Messungen an sphärischen Spiegeln mit definierten Winkeln durchgeführt und diese anschließend mit taktilen Daten verglichen. Die taktilen Messungen gelten als Referenzwerte. Das optische Messsystem stellt die abweichungsbehafteten Vergleichswerte bereit. Die Messabweichung ergibt sich aus der Differenz beider Messreihen. Mit jeweils einem Scan in X- und Y-Richtung wird zusätzlich ein mögliches unsymmetrisches Messverhalten der optischen Sensoren adressiert. Die resultierenden oberflächenwinkelabhängigen Korrekturwerte können anschließend als Lookup-Table hinterlegt werden. Für nachfolgende Messanwendungen werden die Oberflächenwinkel während des Scans in-situ aufgezeichnet und die Messabweichungen durch die hinterlegten Korrekturdaten kompensiert.

3.2.2.1 Messung des Oberflächenwinkels

Ausgehend von einem gaußförmigen Strahlprofil befindet sich die höchste Intensitätsdichte des Messstrahls in seiner optischen Achse. Die Strahlverlagerung V zwischen den optischen Achsen des einfallenden und des reflektierten Strahls lässt sich in Abhängigkeit des Oberflächenwinkels γ für einfache optische Systeme geometrisch-optisch formulieren. Anhand der Abbildung 3.7 lassen sich folgende Zusammenhänge aufstellen.:

Abbildung 3.7: Analyse der geometrischen Zusammenhänge eines Strahlenganges durch ein vereinfachtes Objektiv (vgl. auch Abb. 3.2):

Orange	Einfallende optische Achse
Grün	Reflektierte optische Achse
α	Halber Öffnungswinkel des Objektivs
γ	Oberflächenwinkel
wd	Arbeitsabstand
V	Äußere Strahlverlagerung
V'	Innere Strahlverlagerung
d_A	Durchmesser der Eintrittspupille
d_O	Durchmesser der Austrittspupille



Für den Durchmesser der Austrittspupille d_O gilt unter Einbeziehung des Arbeitsabstandes wd :

$$d_O = 2wd \cdot \tan(\alpha) \quad (3.6)$$

Dabei ist α als halber Öffnungswinkel des Objektivs definiert. Die Gleichung der numerischen Apertur (vgl. Formel 1.6) nach α umgestellt ergibt sich zu

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{NA}{n} \right). \quad (3.7)$$

Die innere Strahlverlagerung zwischen der Kollimator- und der Fokuslinse V' lässt sich in Abhängigkeit des Oberflächenwinkels der Probe γ zu Gleichung

$$V' = wd \cdot \tan(2\gamma) \quad (3.8)$$

zusammenfassen. Weiterhin gilt zwischen den Durchmessern von Eintritts- und Austrittspupille d_A und d_O und der inneren und der äußeren Strahlverlagerung V' und V der Strahlensatz. Dieser Zusammenhang ergibt sich zu

$$\frac{V}{V'} = \frac{d_A}{d_O}. \quad (3.9)$$

Die Formeln 3.6 bis 3.9 ineinander eingesetzt, ergeben die nichtlineare Strahlverlagerungsfunktion in Abhängigkeit des Oberflächenwinkels

$$V(\gamma) = \frac{d_A}{2} \cdot \frac{\tan(2\gamma)}{\tan(\sin^{-1}(\frac{NA}{n}))}. \quad (3.10)$$

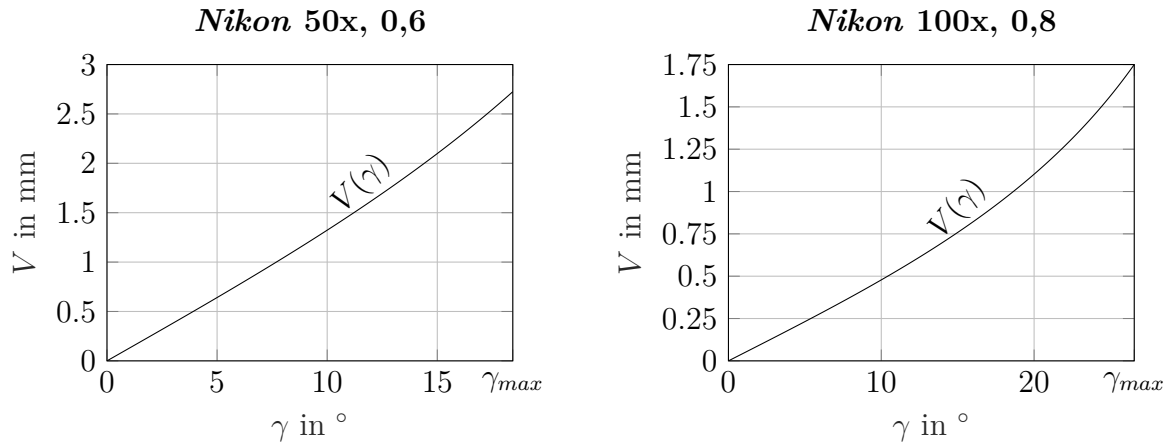


Abbildung 3.8: Strahlverlagerungsfunktionen der *Nikon*-Objektive: Nach Formel 3.10 lässt sich die Strahlverlagerung V in Abhängigkeit vom Oberflächenwinkel γ bestimmen.

Diese Gleichung gilt für den Definitionsbereich $D = \{|\gamma| \leq \frac{\alpha}{2}\}$, d.h. dem Bereich bis der von der optischen Achse reflektierte Strahl nicht mehr in das Objektiv zurück trifft. Zur Überprüfung der Gültigkeit dieser Gleichung werden die Kennwerte des $100\times$ *Nikon*-Objektivs eingesetzt. Dessen Eintrittspupille besitzt einen Durchmesser von $d_A = 3,5\text{ mm}$. Die numerische Apertur beträgt $NA = 0,8$. Aus der numerischen Apertur ergibt sich der maximale erfassbare Oberflächenwinkel $\gamma_{max} = \frac{\alpha}{2} = 26,55^\circ$ bei einer Brechzahl in Luft von $n = 1,000292$. Damit ergibt sich eine maximale Strahlverlagerung V_{max} von

$$V_{max} = \frac{3,5\text{ mm}}{2} \cdot \frac{\tan(2 \cdot 26,55^\circ)}{\tan(\sin^{-1}(\frac{0,8}{1,000292}))} = 1,75\text{ mm} \quad (3.11)$$

für den größten noch erfassbaren Oberflächenwinkel. Oberflächenwinkel mit negativen Vorzeichen werden um den gleichen Betrag in die Gegenrichtung ausgelenkt. Die Strahlverlagerung beider Richtungen summiert sich zum Wert des Durchmessers der begrenzenden Eintrittspupille d_A . Damit wird die Gültigkeit der ausgearbeiteten Gleichung bestätigt.

Der nichtlineare Zusammenhang zwischen Oberflächenwinkel und Strahlverschiebung ist nach dieser Gleichung für die *Nikon*-Objektive berechnet worden. In Abbildung 3.8 sind die Ergebnisse zu sehen. Um den Oberflächenwinkel γ direkt zu messen, kann die Strahlverlagerung $V(\gamma)$ mit Hilfe eines optischen Positionssensors (engl.: Position Sensitive Device (PSD)) aufgenommen und direkt in einen konkreten Oberflächenwinkel überführt werden. Betrachtet man den Aufbau des Sensorkopfes in Abbildung 2.5 ist zu erkennen, dass ein Teil des reflektierten Messstrahls bereits in Richtung Kamera

umgelenkt wird. Der dichroitische Spiegel ist dafür ausgelegt, die Wellenlänge des Messlasers zu transmittieren. Anstelle der Kamera und der Kameralinse kann dort die PSD angebracht werden [91, 96, 97]. Alternativ kann auch ein weiteres strahlteilendes optisches Element eingefügt werden, damit zeitgleich die Kamera und die PSD verwendet werden können.

3.2.2.2 Taktile Referenzmessung

Für die Referenzmessung wird der taktile Tastschnittsensor mit einem Tastspitzenradius $r_T = 2\text{ }\mu\text{m}$ genutzt (vgl. Kapitel 1.3.1). Als Messobjekt wird ein sphärischer Hohlspiegel (*Edmund Optics 43-464*) mit einem Krümmungsradius von $r_S = 20\text{ mm}$ verwendet. Dieser besitzt einen kontinuierlich steigenden Oberflächenwinkel und dient damit als definiertes Winkelprüfmaß. Für die Messung wird der Scheitelpunkt S des Spiegels iterativ ermittelt und als Koordinatennullpunkt verwendet. Von diesem Punkt aus wird entlang der X- und Y-Achse jeweils ein Linienscan aufgenommen. Diese werden anschließend gefittet, um eventuelle Verunreinigungen der Oberfläche auszugleichen und das Signalrauschen zu kompensieren. Die Koordinaten der lateralen Bewegungen in x und y können anschließend, abhängig vom Krümmungsradius des Spiegels, direkt in Winkelwerte nach

$$\gamma(x) = \sin^{-1}\left(\frac{x}{r_S}\right) \text{ und} \quad (3.12)$$

$$\gamma(y) = \sin^{-1}\left(\frac{y}{r_S}\right) \quad (3.13)$$

umgerechnet werden. Für die Untersuchung wird sich zunächst auf einen Winkelbereich von $\pm 10^\circ$ beschränkt. Das entspricht einer translatorischen Bewegung von ca. $\pm 3,5\text{ mm}$ auf dieser Probe. Aufgrund der physischen Tastspitze des taktilen Systems sind die gemessenen Höhenwerte mit einem systematischem Fehler behaftet. Die Abmaße der Tastspitze führen zu einer Verlagerung des Berührungspunktes zwischen Tastkugel und Hohlspiegel und zu einer Messabweichung in z-Richtung. In Abbildung 3.9 a) sind die geometrischen Zusammenhänge dargestellt. Die Korrektur der Werte erfolgt in erster Näherung durch

$$k(\gamma) = \frac{r_T}{\cos(\gamma)}. \quad (3.14)$$

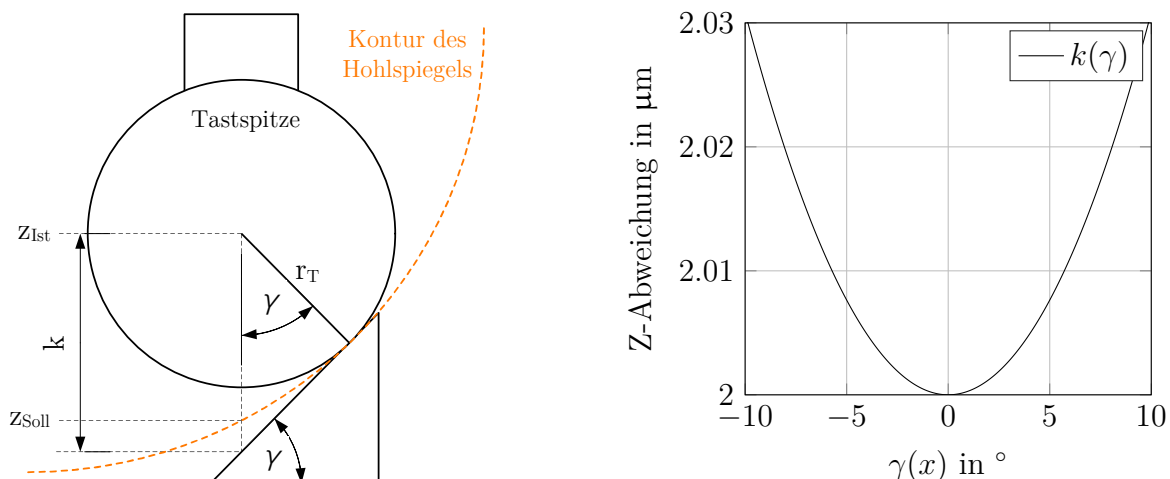


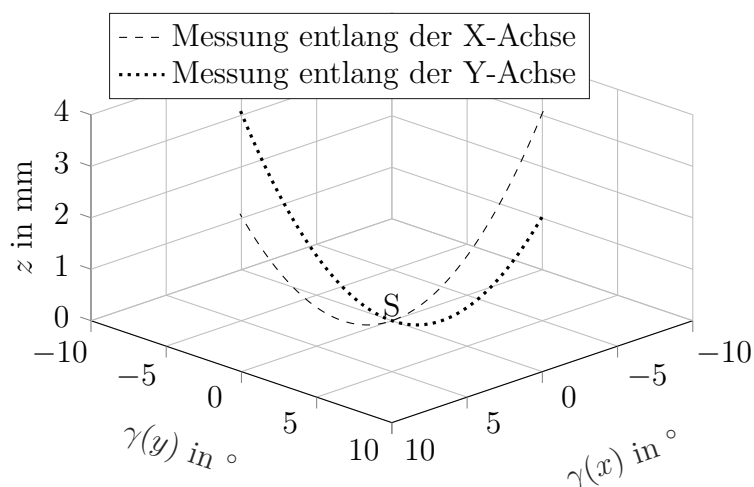
Abbildung 3.9: Korrektur des Tastspitzenradius eines taktilen Sensors:

links: Darstellung der Winkelbeziehungen zwischen Tastspitze und Oberfläche.

rechts: Ermittelte taktile Messabweichungen aufgrund der Tastspitze in Abhängigkeit des Oberflächenwinkels.

Eine weiterreichende Korrektur ist aufgrund der kleinen Winkel nicht erforderlich. Auf der rechten Seite der Abbildung 3.9 sind die resultierenden Abweichungen aufgrund der Tastspitze und in Abhängigkeit des Oberflächenwinkels aufgetragen. In der Nulllage muss nur der Radius der Tastspitze von $r_T = 2\text{ }\mu\text{m}$ korrigiert werden. Entlang der Spiegelkontur bilden sich zusätzliche Abweichungen bis zu 30 nm aus. Um die systematische Messabweichung zu kompensieren, werden diese Werte von den Messdaten subtrahiert. In Abbildung 3.10 sind die korrigierten Daten entlang der X- und Y-Achse aufgetragen. Die Achsen sind entsprechend der Formeln 3.12 und 3.13 direkt in Oberflächenwinkelwerte umgerechnet.

Abbildung 3.10: Korrigierter Datensatz des taktil gemessenen sphärischen Spiegels.



3.2.2.3 Optische Vergleichsmessung

Für die optische Vergleichsmessung wird die Maschine mit dem Fokussensor und dem $50\times$ *Nikon*-Objektiv ausgestattet. Die Probe bleibt für diese Messung unverändert. Die optischen Messungen werden ebenfalls entlang der X- und der Y-Achse geführt. Vom Fokussensor ist bereits ein anisotropes Messverhalten aufgrund der foucaultschen Fokusdetektion bekannt (vgl. Kapitel 1.3.2 und 1.6). Dadurch sind mit diesem Sensor entlang der X-Achse Winkel bis zu $\pm 10^\circ$, entlang der Y-Achse jedoch nur ungefähr $\pm 4,5^\circ$ erfassbar. Die zu bestimmenden Messabweichungen des Fokussensors ergeben sich durch die Subtraktion der taktilen Referenzmessung von den optischen Vergleichswerten. Nach verschiedenen Versuchen konnten erfolgreiche Scans durchgeführt und mit den taktilen Daten verglichen werden. In Abbildung 3.11 sind die resultierenden optischen Messabweichungen entlang der Hauptachsen aufgetragen. Durch eine polynomiale Regression werden die zufälligen Abweichungen verringert. Die maximalen Messabweichungen entlang der Achsen betragen für den gemessenen Winkelbereich $dz(x) \approx -700$ nm und $dz(y) \approx -620$ nm.

Anhand dieser Kurven kann nun eine systematische Korrektur der Messabweichungen erfolgen. Dafür müssen die Scheitelpunkte beider Messreihen numerisch ermittelt und in Deckung gebracht werden. Durch Überlagerung der Abweichungen beider Messreihen lassen sich anschließend für alle kombinierten Oberflächenwinkel $\gamma(x, y)$ Näherungen für die Messabweichungen berechnen. Nach dem Superpositionsprinzip lässt sich folgender Zusammenhang aufstellen:

$$dz(\gamma(x, y)) = \sqrt{(K_1 \cdot \cos(\theta) \cdot dz(\gamma(x)))^2 + (K_2 \cdot \sin(\theta) \cdot dz(\gamma(y)))^2}. \quad (3.15)$$

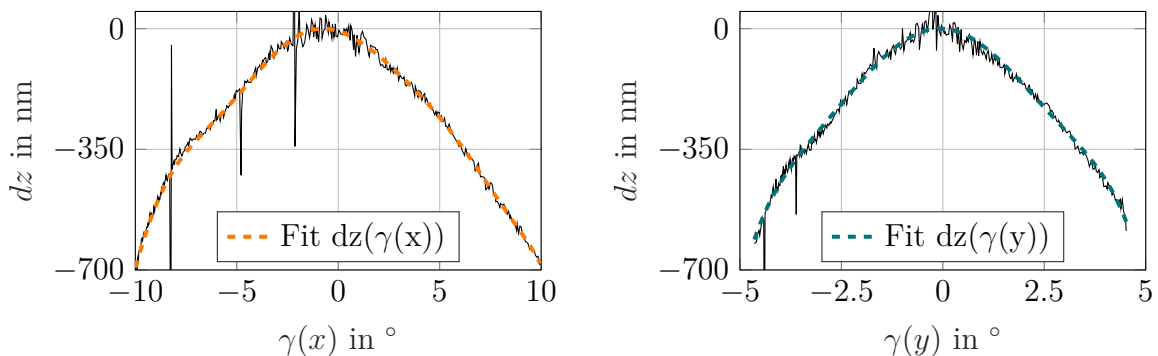


Abbildung 3.11: Optische Vergleichsmessung des sphärischen Spiegels mit dem Fokussensor. Das Messsystem zeigt ein unsymmetrisches Messverhalten entlang der Hauptachsen.

links: Messung entlang der X-Achse.

rechts: Messung entlang der Y-Achse.

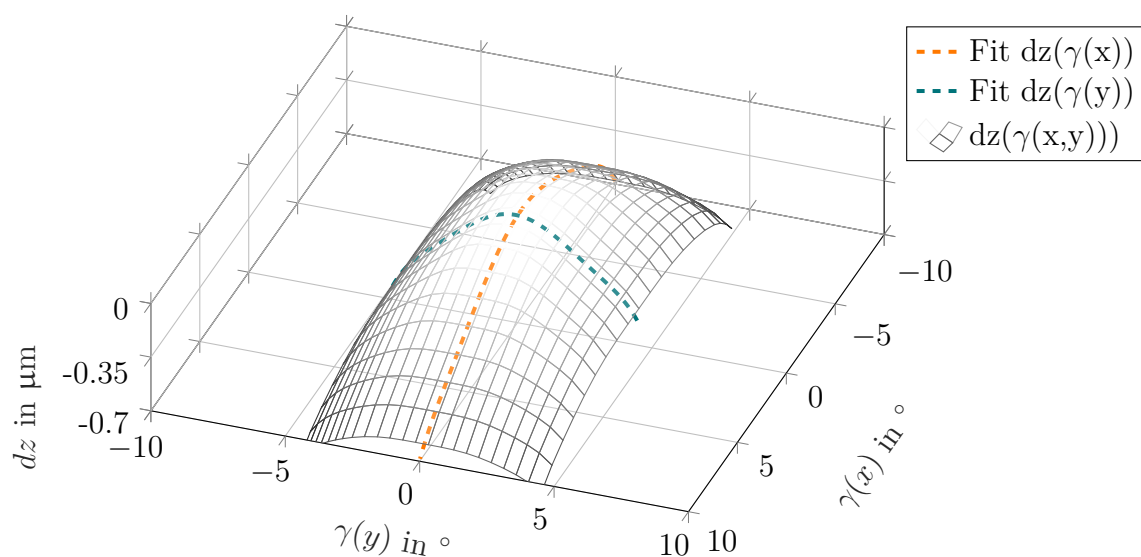


Abbildung 3.12: Abweichungen zwischen taktiler und optischer Messung. Für alle kombinierten Winkellagen sind die Abweichungen $dz(\gamma(x, y))$ durch Interpolation nach dem Superpositionsprinzip berechnet.

Dabei ist θ der Polarwinkel, der zwischen der X-Achse ($\theta = 0^\circ$) und der Y-Achse ($\theta = 90^\circ$) kombinierte Oberflächenwinkelpaarungen beschreibt ($\gamma(x, y) = \gamma(\theta)$). Die Korrekturfaktoren K_1 und K_2 werden benötigt, um die ungleichmäßige Fehlerrückbildung entlang der Hauptachsen zu korrigieren. Die Korrekturfaktoren können ebenfalls empirisch durch weitere Vergleichsmessungen an kombinierten Winkellagen ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Abbildung 3.12 dargestellt. Die Werte der Korrekturdaten können in der Verarbeitungssoftware hinterlegt und in Abhängigkeit der mitaufgenommenen Oberflächenwinkel korrigiert werden.

3.2.2.4 Empfehlungen für weitere Untersuchungen

Während dieser Untersuchungen zeigte sich ein zusätzlicher Einfluss auf die Größe der Abweichung in Abhängigkeit der Messgeschwindigkeit. Ein solcher Zusammenhang wurde in dieser Arbeit bisher noch nicht betrachtet. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Regler den Sollwert zwischen Objektiv und Probe mit steigendem Winkel nicht schnell genug nachstellen können und sich dadurch die absoluten Messabweichungen bei hohen Geschwindigkeiten verstärkt ausprägen. Dadurch verändert sich auch der maximal erfassbare Winkelbereich des Sensors in Abhängigkeit der Messgeschwindigkeit. Frühere Untersuchungen zur Winkelabhängigkeit des Fokussensors nach [131] zeigen ebenfalls größere messbare Winkelbereiche und unterstützen diese Vermutung.

Die mit Hilfe dieses Ansatzes ermittelten Korrekturdaten gelten damit nur für eine bestimmte Messgeschwindigkeit v_M . Darüber hinaus gelten die Daten, aufgrund der fresnelschen Zusammenhänge, auch nur für die Reflektivitätskoeffizienten ρ , die dem des gemessenen Spiegels entsprechen [135]. Speziell für Proben mit geringen Reflexionskoeffizienten, wie bspw. Glas, müssen zusätzliche Untersuchungen durchgeführt werden. Da sich die Messwertaufnahme an gekrümmten Oberflächen sehr umständlich gestaltet (siehe dazu Kapitel 5.3), sollten für Messaufgaben an gekrümmten Oberflächen im Vorfeld die für diese Messung erforderlichen Parameter v_M und ρ festgelegt oder ermittelt werden. Die Auswahl der sphärischen Winkelprobe zur Fehlerkalibrierung erfolgt anschließend anhand dieser Eigenschaften.

Mikro- und Nanostrukturierung auf Basis der Konfokalsensorik

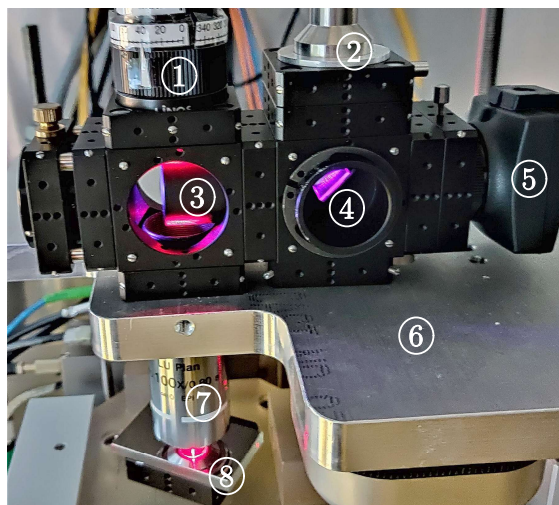
Das entwickelte konfokale System wird zur sensorischen Abstandsregelung zwischen Objektiv und Probe für Direct Laser Writing-Anwendungen in *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen* eingesetzt. Dadurch sollen möglichst gleichmäßige Strukturen mit möglichst geringen Strukturbreiten erzeugt werden. Eine zuverlässige Funktionsweise der Kombination aus Positioniermaschine, Abstandssensor und lithografischem Prozesslaser ist dafür entscheidend. Das Ziel ist, die Prozessparameter so anzupassen, dass der Strukturierungsprozess critical dimensions in der Größenordnung theoretischer Limitationen erzeugt.

4.1 Setup und funktionaler Nachweis

Das lithografische Setup wird nach Abbildung 2.5, als Erweiterung des konfokalen Sensorkopfes aufgebaut. In Abbildung 4.1 ist der Aufbau innerhalb der *NPMM* zu sehen. Das violette Licht entsteht durch die Überlagerung der roten Mess- und des blauen Lithografielasers. Fluchtend zum Objektiv ist der Fokussierkollimator (1) der Messlaser angeordnet. Dort ist auch der Außenring zur Verstellung der Kollimatorlinse zu sehen. Damit ist es möglich die Fokalebene der Messlaser auf die Fokalebene des Lithografielasers anzugleichen (vgl. Kapitel 2.3.3).

Abbildung 4.1: Lithographiesystem in Kombination mit dem konfokalen Messsystem:

- 1 Fokussierkollimator der Messwellenlängen
- 2 Fix-Kollimator der Lithografiewellenlänge
- 3 Strahlteilerwürfel
- 4 Dichroitischer Spiegel
- 5 Beobachtungskamera
- 6 Deckplatte der *NPMM*
- 7 100x *Nikon*-Objektiv
- 8 Probe



Für den ersten lithografischen Schreibversuch wird der Fokussierkollimator im Grundzustand, also ohne Verschiebung der Linse, verwendet. Für den Strukturierungslaser wird der Fix-Kollimator *F810APC-405* (2) der Firma *Thorlabs* mit der Brennweite $f_{Koll} = 33,9 \text{ mm}$ genutzt. Für die lithografische Anwendung wird das *Nikon-100x* Objektiv (7) mit der Brennweite $f_{Obj} = 2 \text{ mm}$ verwendet. Nach Formel 1.8 ergibt sich als Größe des abgebildeten Faserkerndurchmessers ($d_K = 2,8 \mu\text{m}$) ein Wert von

$$B = \frac{d_K \cdot f_{Obj}}{f_{Koll}} = \frac{2,8 \mu\text{m} \cdot 2 \text{ mm}}{33,9 \text{ mm}} = 0,165 \mu\text{m}. \quad (4.1)$$

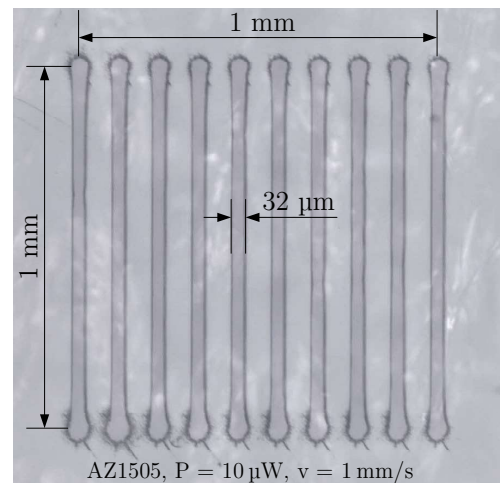
Dieser Wert unterschreitet den nach Formel 2.14 berechneten beugungsbegrenzten minimalen Spotdurchmesser von

$$d_P = 2 \cdot K_R = 2 \cdot \frac{0,61 \lambda}{NA} = 1,22 \cdot \frac{405 \text{ nm}}{0,8} = 617 \text{ nm}. \quad (4.2)$$

Nach dem Rayleigh-Kriterium sind damit theoretisch critical dimensions in Größe der Beugungsbegrenzung möglich ($CD = d_P = 617 \text{ nm}$).

Als Resist wird, vergleichbar zu den Vorversuchen aus Kapitel 1.5.2, der Positivlack *AZ 1505* auf einem Glassubstrat aufgetragen. In einem Bereich von $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ werden zehn Linien mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/s und einer Laserleistung von ungefähr $P \approx 10 \mu\text{W}$ nebeneinander geschrieben. Die eingestellte Laserleistung wird für die Versuche zunächst mit einem Leistungsmessgerät bestimmt. Der Prozesslaser wird über einen *Arduino Uno* angesteuert, der die TTL-Spannung zur Steuerung des Shutters liefert.

Abbildung 4.2: Strukturierung unter Verwendung des konfokalen Aufbaus. Die hohen Strukturbreiten lassen auf ein hohes Optimierungspotential der lithografischen Strukturierungsparameter schließen. Durch die Positionierpräzision der *Nanopositionier- und Nanomessmaschine* und die messtechnische Güte des konfokalen Sensors wird eine hohe Gleichförmigkeit der Strukturen erzielt. Die tropfenförmigen Ausprägungen an den Linien sind auf die Beschleunigungsabschnitte und den dadurch erhöhten Energieeintrag in den Photoresist zurückzuführen.



Die erzeugten Strukturen dieses Versuchs sind in Abbildung 4.2 festgehalten. Die einzelnen Linien weisen aufgrund ihrer Gleichförmigkeit auf eine stabile Laserleistung und eine gute Reproduzierbarkeit des Prozesses hin. Dies gelingt über einen so großen Bereich nicht zuletzt aufgrund der hohen Positionier- und Bahnpräzision der *Nanopositionier- und Nanomessmaschine*. Die Messung der critical dimensions erfolgt mit Hilfe eines *Nikon*-Lichtmikroskops und der dazugehörigen Messsoftware. Auffallend ist die vergleichsweise große Strukturbreite von $CD = 32 \mu\text{m}$. Dies ist auf verschiedene Effekte des Prozesses zurückzuführen, die in folgenden Kapiteln einzeln beleuchtet werden. Am Anfang und Ende der einzelnen Linien sind tropfenförmige Strukturen mit erhöhten Breiten entstanden. Diese sind auf temporär erhöhte Dosen aufgrund der Anfahrtsbeschleunigung zurückzuführen. Die Anwendbarkeit des konfokalen Messsystems für lithografische Anwendungen innerhalb der *NPMM* ist nachgewiesen. Nun gilt es die Prozessparameter zur Erreichung minimaler Strukturbreiten zu optimieren.

4.2 Optimierung der Prozessparameter

Zu den Prozessparametern, die Einfluss auf die Strukturbreiten nehmen, gehören unter anderem der Schnittweitenunterschied Δ_{sw} zwischen dem Lithografie- und der Messlaser, die Lithografiwellenlänge λ_P , die numerische Apertur NA des verwendeten Objektivs, die Strahlqualität M^2 des Lithografielasers sowie die in den Photolack eingebrachte Dosis D . Die Empfindlichkeit des verwendeten Resists und die aufgetragene Resistschichtdicke t_R haben ebenfalls einen Einfluss auf die Größe der critical dimensions. In den folgenden Versuchen werden einige der genannten Prozessparameter systematisch angepasst, um die Strukturgrößen sukzessive zu verringern.

4.2.1 Schnittweitenkorrektur

Aufgrund der durch das Objektiv verursachten Dispersion, entsteht zwischen den Fokalebene der Messwellenlängen und der Fokalebene der Lithografiewellenlänge ein Versatz entlang der optischen Achse (vgl. Abb. 1.13 und Kap. 2.3.4.2). So wird der Resist zwar sensorisch angetastet, jedoch liegt der Spot für die optimale Strukturierung in einer versetzten Ebene. Dadurch vergrößern sich die critical dimensions um ein Vielfaches. In Abbildung 4.3 ist die Aufweitung des Lithografielasers durch die Schnittweitendifferenz dargestellt. Durch die Änderung des Kollimationszustandes der Messlaser, können deren Fokalebene entlang der optischen Achse gezielt verlagert und die Schnittweiten der Laser zueinander korrigiert werden. Für diese Schnittweitenkorrektur (*SWK*) wird die Linse des Fokussierkollimators um einen definierten Abstand d_K so verschoben, dass sich der Arbeitsbereich des Sensors um die Fokalebene des Lithografielasers verlagert. Die benötigte *SWK* kann experimentell mit dem bereits bekannten Ansatz nach [126] zur Bestimmung der Fokuspunktdurchmesser und der Lage der Fokalebene ermittelt werden (vgl. Kap. 2.15). Da der Lithografielaser, von den Messwellenlängen entkoppelt, mit einem Fixkollimator verbunden ist, bleibt sein Fokussierungszustand zu jeder Zeit unverändert.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung zur benötigten *SWK* sind in Abbildung 4.4 dargestellt. Zwischen der Fokalebene des Lithografielasers und dem mittleren Bereich zwischen den Fokalebene der Messlaser beträgt die *SWK* ungefähr $3,1 \mu\text{m}$. Der Fokuspunktdurchmesser des Lithografielasers lässt sich ebenfalls anhand der Messung ablesen und beträgt ohne Berücksichtigung systematischer Abweichungen $d_P = 1,48 \mu\text{m}$. Auch in diesem Fall ist noch eine deutliche Abweichung vom theoretischen Wert nach Formel 4.2 zu erkennen.

Abbildung 4.3: Möglichkeit der Schnittweitenkorrektur: Durch die Verschiebung der Kollimatorlinse um d_K werden die Schnittweiten der Messlaser zum Objektiv hin verkürzt, so dass die Fokalebene des Lithografielasers im Arbeitsbereich des Sensors liegt.

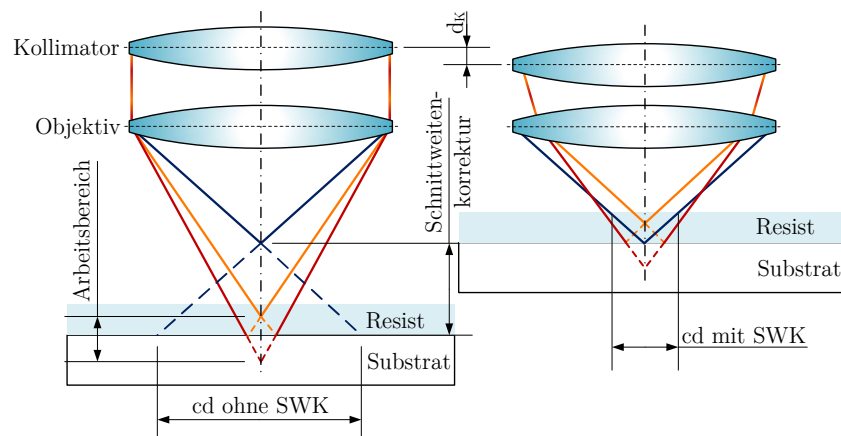
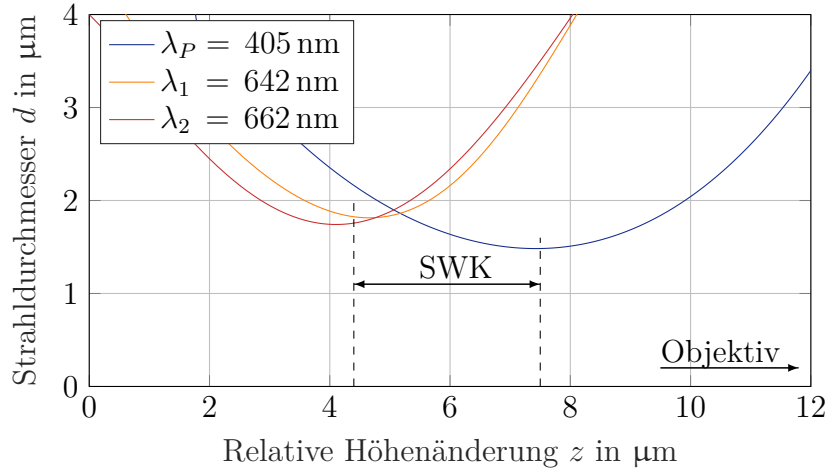


Abbildung 4.4: Experimentelle Ermittlung der benötigten Schnittweitenkorrektur. Durch die bereits erläuterte Messmethodik nach [126] lassen sich die nötige Schnittweitenkorrektur und die Strahldurchmesser der einzelnen Wellenlängen bestimmen.



Um die Fokalebene des Messlasers etwa äquidistant um die des Lithografierlasers zu positionieren, wird der Fokussierkollimator verstellt. Der Justagering kann um 360° verdreht werden, um die Kollimatorlinse translatorisch zu verschieben. In der Messreihe wird der Justagering in 5° -Schritten verändert. An den jeweiligen Messstellen wird für die Messwellenlängen λ_1 und λ_2 jeweils eine Messreihe zur beschriebenen Fokussuchung durchgeführt und die relative Lageveränderung der Fokalebene untersucht. Zur Überprüfung umweltbedingter Drifts über die Dauer der Untersuchung, wird in 20° -Schritten zusätzlich die Fokusposition des Lithografierlasers überprüft. Diese sollte sich unter stabilen Messbedingungen nicht ändern. Die Ergebnisse dieser Untersuchung finden sich in Abbildung 4.5. Aufgrund der Beständigkeit des lithografischen Referenzwertes, kann von hinreichend stabilen Messbedingungen ausgegangen werden. Bei einer

Abbildung 4.5: Messreihe zur Ermittlung der Kollimatorstellung, die die Schnittweiten gezielt korrigiert. Der Fokussierkollimator wird in 5° -Schritten verstellt und die Methodik nach [126] an diesen Stellen für die Messwellenlängen durchgeführt.

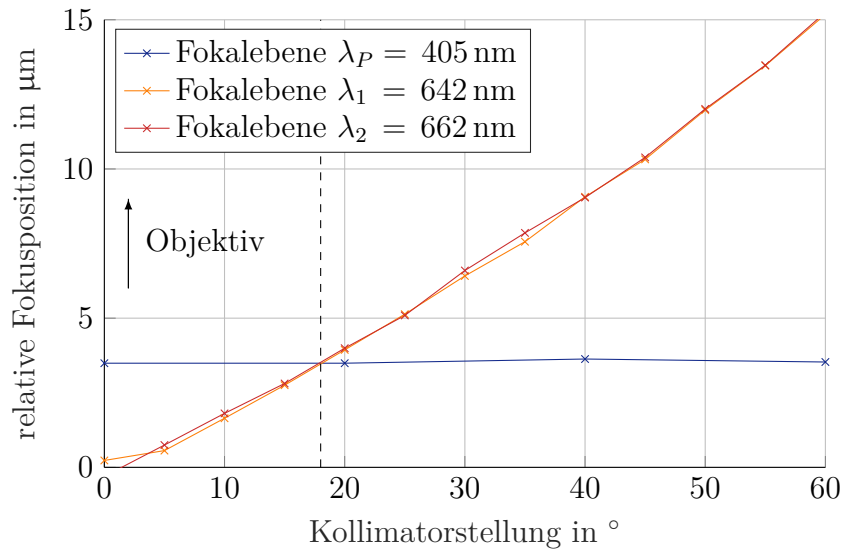
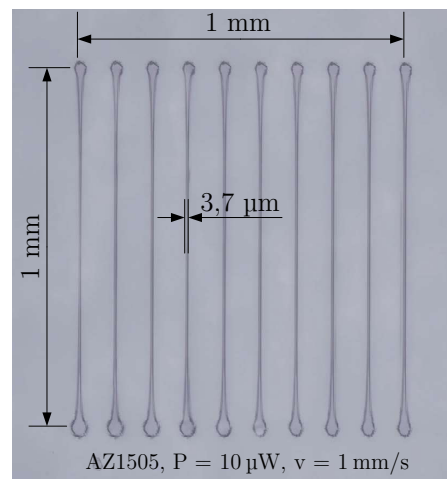


Abbildung 4.6: Strukturierung nach Anpassung der Fokalebene. Durch die korrekte Justage des Fokussierkollimators für die lithografische Anwendung konnten die critical dimensions signifikant verbessert werden. Unter gleichen Strukturierungsbedingungen und gleichbleibenden Prozessparametern wurden die Strukturbreiten von $CD = 32\ \mu\text{m}$ auf $CD = 3,7\ \mu\text{m}$ verringert (vgl. auch Abb. 4.2).



Verdrehung des Justagerings um 18° liegt die Fokalebene des Lithografielasers im Arbeitsbereich der konfokalen Messwellenlängen. Durch diese Justage wird sichergestellt, dass das Direct Laser Writing zuverlässig und konsequent im Fokus des Lithografielasers stattfindet. So konnten die Strukturbreiten auf ungefähr ein Zehntel des vorherigen Versuchs, zu $CD = 3,7\ \mu\text{m}$, reduziert werden. Abbildung 4.6 zeigt die Ergebnisse der Strukturierung. Der Versuch wurde unter den gleichen Bedingungen wie in Kapitel 4.1 mit einer Geschwindigkeit von $v = 1\ \text{mm/s}$ und einer Laserleistung von $P \approx 10\ \mu\text{W}$ durchgeführt.

4.2.2 Resistauswahl

Die Resiste werden in der Regel durch das Spin-Coating-Verfahren auf einem Trägermaterial, dem Substrat, aufgetragen. Dafür wird der Resist in flüssiger Form auf das Substrat gegeben und anschließend mit dem Spin-Coater, typischerweise bei einer Drehzahl von $n = 2000\ \text{rpm} - 6000\ \text{rpm}$, aufgeschleudert. Je nach Art des Lackes und der eingestellten Drehzahl können so verschiedene Resistschichtdicken t_R erzeugt werden. Je geringer eine solche Schichtdicke ausfällt, desto geringer wird auch die vom Laser auf den Lack projizierte wirksame Belichtungsfläche zur Strukturierung des Resists (siehe dazu auch die Abbildungen 1.9 und 4.3). Das kann zu einer weiteren Verringerung der Strukturbreiten führen.

4.2.2.1 Prozessfolge beim Auftragen der Resiste

In der Regel werden in der Halbleiter- und Mikrosystemtechnik Wafer aus monokristallinem Silizium als Substrat verwendet [143]. Für die folgenden Grundlagenunter-

Tabelle 4.1: Prozessierungshinweise verwendeter Photoresiste

Prozess	AZ 1505	AZ ECI 3007	mr-DWL 0.5	mr-DWL 0.1
Haftvermittler	Hexamethyldisilazan	Hexamethyldisilazan	-	-
Spin-Coating	$n = 4000 \text{ rpm}$, $t = 60 \text{ s}$	$n = 4000 \text{ rpm}$, $t = 60 \text{ s}$	$n = 3000 \text{ rpm}$, $t = 60 \text{ s}$	$n = 4000 \text{ rpm}$, $t = 60 \text{ s}$
Pre-Bake	$\vartheta = 115^\circ\text{C}$, $t = 60 \text{ s}$	$\vartheta = 90^\circ\text{C}$, $t = 120 \text{ s}$	$\vartheta = 100^\circ\text{C}$, $t = 120 \text{ s}$	$\vartheta = 100^\circ\text{C}$, $t = 120 \text{ s}$
Entwicklung	$t = 30 \text{ s}$ in <i>AZ Developer</i>	$t = 30 \text{ s}$ in <i>AZ MIF</i>	$t = 30 \text{ s}$ in <i>mr-Dev 600</i>	$t = 60 \text{ s}$ in <i>mr-Dev 600</i>
Post-Bake	-	-	$\vartheta = 100^\circ\text{C}$, $t = 120 \text{ s}$	$\vartheta = 100^\circ\text{C}$, $t = 120 \text{ s}$
Schichtdicke	$t_R = 500 \text{ nm}$	$t_R = 700 \text{ nm}$	$t_R = 500 \text{ nm}$	$t_R = 100 \text{ nm}$

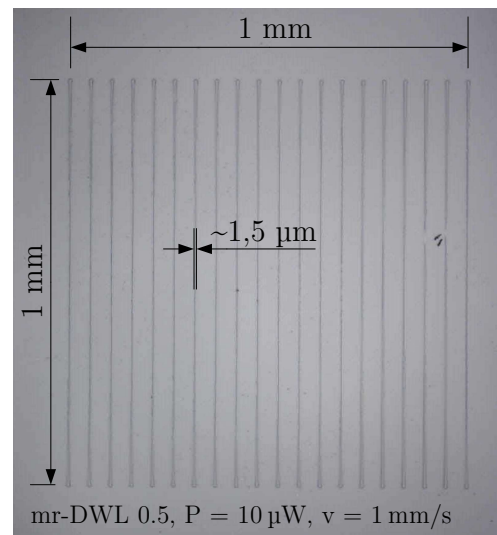
suchungen, bei denen eine hohe Zahl von Proben benötigt werden, wird zunächst auf kostengünstige Glassubstrate zurückgegriffen. Hier eignen sich, aufgrund ihrer Abmaße von $76 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$, Objektivträger für Mikroskopieanwendungen. Diese werden jeweils auf drei gleichgroße, etwa quadratische Probenstücke zugeschnitten. Die resultierende Probengröße entspricht dann ungefähr dem Verfahrensbereich der *NMM-1* von $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ und eignet sich für alle weiteren Untersuchungen innerhalb dieser Maschine.

Um möglichst reproduzierbare, gleichmäßige und saubere Strukturen in der Größenordnung weniger hundert Nanometer erzeugen zu können, müssen vor der Resistbeschichtung alle Partikelverunreinigungen von den Substraten entfernt werden. Dafür durchlaufen alle Probengläser eine gründliche Vorreinigung. Diese besteht aus drei nacheinander durchgeführten Ultraschallbädern - zuerst in Aceton, danach in Isopropanol und abschließend in Wasser. Der Ablauf beim Auftragen eines Photolackes unterscheidet sich je nach verwendetem Resist. Die sogenannten Prozessierungshinweise sind den Datenblättern der jeweiligen Resisthersteller zu entnehmen. Zu den einzelnen Prozessschritten gehören das Aufdampfen eines Haftvermittlers zwischen Substrat und Resist, das Aufschleudern des Resistes durch Spin-Coating, der Pre-Bake-Prozess vor der Belichtung, die Belichtung und das Entwickeln des Photolackes, sowie der Post-Bake-Prozess nach der Entwicklung. In Tabelle 4.1 sind die einzelnen Prozessschritte für die bereits verwendeten und auch für die nachfolgend genutzten Photoresiste aufgeführt.

4.2.2.2 DLW-Resist für 405 nm

Für die Direct Laser Writing-Lithografie existieren spezielle, für diese Anwendung ausgelegte Resiste. Der Lack *mr-DWL* der Firma *micro resist technology* ist für DLW-Anwendungen bei einer Wellenlänge $\lambda_P = 405\text{ nm}$ entwickelt worden und für verschiedene Schichtdicken $t_R = 5\text{ }\mu\text{m} - 100\text{ }\mu\text{m}$ erhältlich. Für weitere Versuche wird der Photoresist *mr-DWL 0.5 XP* verwendet. Diese auf Nachfrage erhaltene Sonderanfertigung wird bei einer Drehzahl von $n = 3000\text{ rpm}$ für eine Lackschichtdicke von $t_R = 0,5\text{ }\mu\text{m}$ aufgetragen [144]. Eine weitere Verringerung der Dicke ist nicht durch eine Erhöhung der Drehzahl möglich. Der Lack bietet jedoch zusätzliche Vorteile. Er wird als Negativresist verwendet, was dazu führt, dass nur die belichteten Bereiche des Lackes erhalten bleiben (vgl. Abb. 1.5). So können auch optische Bauelemente gezielt strukturiert werden. Desweiteren ist die Prozesskette zur Auftragung und Entwicklung des Resists sehr einfach, sodass eine erhöhte Reproduzierbarkeit der Probeneigenschaften erzielt werden kann. Unter gleichbleibenden Strukturierungsparametern erfolgt ein weiterer Lithografieversuch auf diesem Lack. Die Ergebnisse sind der Abbildung 4.7 zu entnehmen. Der Umstieg auf diesen Lack führt zu einer weiteren Verringerung der Strukturbreiten zu $CD \approx 1,5\text{ }\mu\text{m}$.

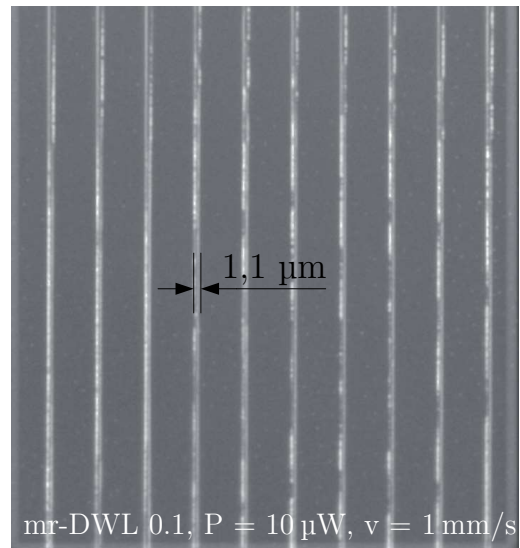
Abbildung 4.7: Strukturierung nach Änderung des Resists. Durch den Umstieg auf einen speziell entwickelten Direct Laser Writing-Resist, ist eine weitere Verkleinerung der critical dimensions auf $CD = 1,5\text{ }\mu\text{m}$ möglich. Die tropfenförmigen Ausbildungen an den Strukturenden konnte durch die Resiständerung ebenfalls verringert werden.



4.2.2.3 Verringerung der Resistschichtdicke

Um eine weitere Verringerung der Resistschichtdicke t_R zu erreichen, kann der Photolack mit einem speziellen Verdünner gemischt werden. Für die Verdünnung wird das Lösungsmittel γ -Butyrolacton empfohlen. Laut Hersteller führt ein Mischungsverhältnis

Abbildung 4.8: Strukturierung nach Verringerung der Resistschichtdicke. Durch eine 1:1-Verdünnung des Resists *mr-DWL 0.5* mit γ -Butyrolacton wird die Schichtdicke auf $t_R = 100\text{ nm}$ verringert. Dadurch wird auch der auf dem Lack wirksame Belichtungsdurchmesser verkleinert und ermöglicht Strukturbreiten von $CD = 1,1\text{ }\mu\text{m}$.



von 1 : 1 zu einer Resistschichtdicke von $t_r = 100\text{ nm}$ [144]. Dieser Wert wurde mit einem Schichtdickenmessgerät, dem Ellipsometer *SE400-CER500* der Firma *Sentech*, bestätigt. Die Verringerung der Lackschichtdicke hat unter gleichbleibenden Leistungs- und Geschwindigkeitsparametern zu einer weiteren Verringerung der critical dimensions zu $CD = 1,1\text{ }\mu\text{m}$ geführt (vgl. Abb. 4.8).

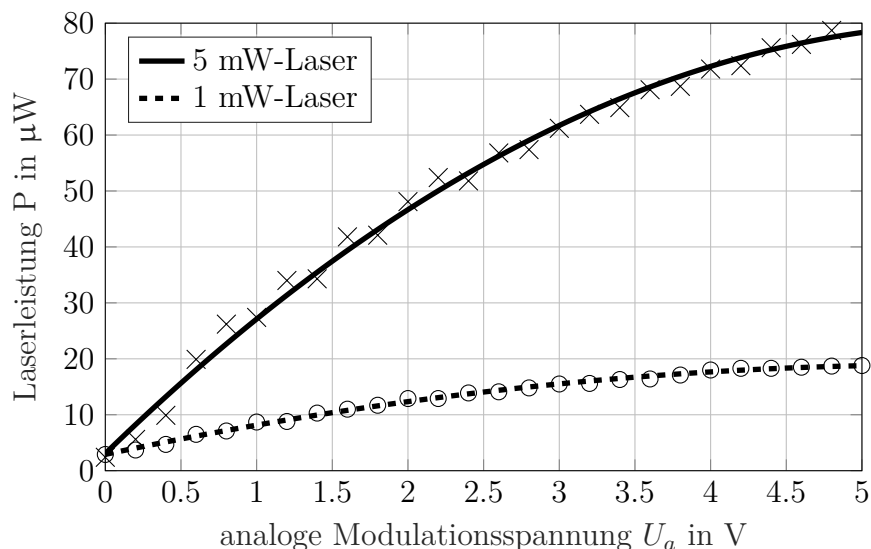
4.2.3 Strukturierungsdosis

Im letzten Schritt der Prozessoptimierung werden Untersuchungen zum Schwellwert der Dosis D durchgeführt, die für die Durchstrukturierung des verdünnten Resists notwendig ist. Bereits im Kapitel 1.5.2 wurde die negative Auswirkung einer zu hohen Strukturierungsdosis erläutert. Diese führt aufgrund der Streuung des Lichts am Substrat zu erhöhten critical dimensions.

4.2.3.1 Strukturierungsleistung am Objektivausgang

Um konkrete Werte für die in den Lack eingebrachte Leistung P zu erhalten, muss die genaue Laserleistung am Objektivausgang des Aufbaus ermittelt werden. Der Strukturierungslaser wird mit Hilfe eines *Arduino Uno* durch eine analoge Modulationsspannung $0\text{ V} \leq U_a \leq 5\text{ V}$ innerhalb seines angegebenen Leistungsbereichs $P_{min} \leq P \leq P_{max}$ eingestellt. Das Potentiometer am Laser ermöglicht eine zusätzliche Leistungseinstellung innerhalb dieser Grenzen. Um vergleichbare Ergebnisse schaffen zu können, wird das Potentiometer auf den maximalen Wert eingestellt ($U_{Pot} = U_{Pot_{max}}$).

Abbildung 4.9: Laserleistung am Objektivausgang des Aufbaus aus Abbildung 2.5 in Abhängigkeit der eingestellten Modulationsspannung.



Für die Messung der resultierenden Laserleistung wird die Photodiode *Hamamatsu S4349* auf dem Probentisch der *NPMM* platziert, mit dem konfokalen Messsystem angetastet und in der Fokalebene positioniert. Anschließend werden die Messlaser aus- und der Strukturierungslaser eingeschaltet. Das Laserlicht erzeugt eine Photospannung U_P in der Photodiode. Diese wird durch einen Präzisionswiderstand in einen Photostrom I_P überführt und durch die angegebene Quanteneffizienz der Photodiode von $QE(\lambda_P) = 0,16 \text{ A/W}$ in einen Wert für die resultierende Leistung am Objektivausgang umgerechnet. Dieses Verfahren wird für beide Strukturierungslaser angewendet. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Der 5 mW-Laser erreicht am Objektivausgang noch einen Leistungsbereich von $3,0 \mu\text{W} - 78,3 \mu\text{W}$. Der 1 mW-Laser erreicht $2,9 \mu\text{W} - 18,7 \mu\text{W}$ Leistung.

4.2.3.2 Ermittlung der idealen Dosis

Um die benötigte Dosis zum Schreiben kleinster Strukturen zu ermitteln, müssen die Schwellwertparameter gefunden werden, bei denen der Übergang von ausreichender Strukturierungsdosis zu nicht ausreichender Strukturierungsdosis erzielt wird. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass die eingebrachte Dosis bei einer Geschwindigkeit von $v_M = 1 \text{ mm/s}$ auch bei sehr geringer Laserleistung noch immer zu hoch ist, um diesen Übergangswert zu erreichen. Abhilfe können Neutraldichtefilter schaffen, die in den Strahlengang eingebracht, die Laserleistung um einen konkreten Faktor verringern. Jedoch werden diese Filter mit Toleranzen bis zu $\pm 15 \%$ der Sollwerte angegeben.

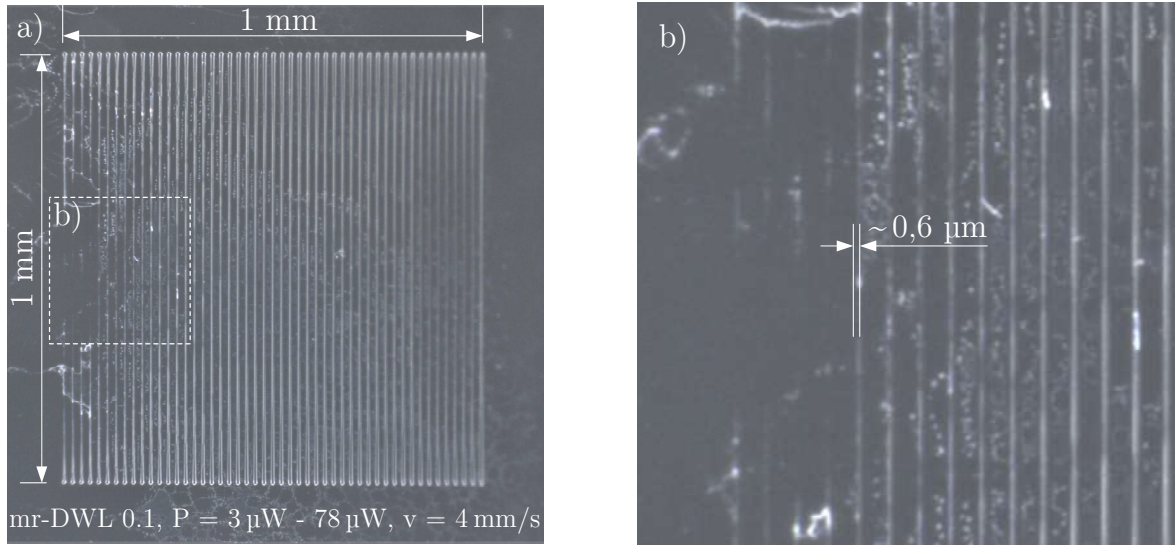


Abbildung 4.10: Strukturierung mit Dosisvariation:

a) Die Modulationsspannung U_a wird pro Linie um $dU_a = 0,1 \text{ V}$ erhöht.

b) Ab einer Modulationsspannung von $U_a = 0,4 \text{ V}$ wird der Resist wieder vollständig durchbelichtet. Die Geschwindigkeits- und Leistungsparameter werden zur Ermittlung eines Schwellwertes herangezogen.

Aufgrund dieser Abweichungen bedingt die Verwendung solcher Filter die erneute Messung der resultierenden Laserleistungsmessung am Objektivausgang. Eine andere Möglichkeit zur Reduktion der Dosis ist aber durch die Geschwindigkeitsabhängigkeit gegeben. Durch eine höhere Strukturierungsgeschwindigkeit wird die eingebrachte Dosis verringert. Das konfokale Messsystem ermöglicht Geschwindigkeiten bis zu 5 mm/s auf ebenen Oberflächen. Zunächst wird die Messgeschwindigkeit für diese Untersuchungen auf $v_M = 4 \text{ mm/s}$ eingestellt. Abermals werden in einem Bereich von $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ lineare Strukturen geschrieben. Die Leistung wird gezielt durch die Änderung der analogen Modulationsspannung am Laser zwischen $P_{min} = 3 \mu\text{W}$ und $P_{max} = 78,3 \mu\text{W}$ geändert. Die Lasermodulationsspannung wird dafür pro Linie in $0,1 \text{ V}$ -Schritten von $U_a = 0 \text{ V}$ auf $U_a = 5 \text{ V}$ vergrößert.

Abbildung 4.10, a) zeigt die Ergebnisse dieses Versuchs. An den ersten vier Strukturen der Abbildung 4.10, b) ist zu erkennen, dass der Resist durch die zu geringe Dosis nicht mehr gänzlich durchbelichtet wird. Erst ab einer Leistung von $P(U_a = 0,5 \text{ V}) = 15,6 \mu\text{W}$ sind die Linien wieder vollständig strukturiert. Die Linienbreite beträgt an dieser Stelle ungefähr $CD \approx 0,6 \mu\text{m}$ und unterschreitet damit erstmals die $1 \mu\text{m}$ -Grenze in dieser Arbeit. In Kapitel 4.1 wurde nach dem Rayleigh-Kriterium für diesen Aufbau ein theoretisch begrenzender Wert von $d_P = 617 \text{ nm}$ berechnet. Die Prozessparameter sind daher offensichtlich weitestgehend optimiert. Die

eingestellte Laserleistung $P = 15,6 \mu\text{W}$ und die Geschwindigkeit $v_M = 4 \text{ mm/s}$ werden als Schwellwertparameter zur Berechnung der idealen Dosis herangezogen, die zum Erreichen dieser Strukturgrößen erforderlich ist. Die belichtete Fläche A wird, analog zur Berechnung aus Kapitel 1.5.2, unter der Annahme einer Kreisfläche über die Größe der critical dimension berechnet und beträgt

$$A = \pi \cdot \left(\frac{CD}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{0,6 \mu\text{m}}{2}\right)^2 = 0,28 \mu\text{m}^2. \quad (4.3)$$

Die Belichtungszeit für ein solches Flächenelement beträgt in Abhängigkeit der Verfahrensgeschwindigkeit v_m

$$t = \frac{CD}{v_m} = \frac{0,6 \mu\text{m}}{4 \text{ mm/s}} = 0,15 \text{ ms}. \quad (4.4)$$

Der daraus resultierende Energieeintrag in den Resist ergibt sich zu

$$E = P \cdot t = 15,6 \mu\text{W} \cdot 0,15 \text{ ms} = 2,34 \cdot 10^{-9} \text{ Js}. \quad (4.5)$$

Daraus resultiert eine Dosis von

$$D = \frac{E}{A} = \frac{2,34 \cdot 10^{-9} \text{ Js}}{0,28 \mu\text{m}^2} = 8350 \text{ Js/m}^2, \quad (4.6)$$

die für das Strukturieren des Lackes notwendig ist. Für diese Idealdosis kann nun eine Geschwindigkeits-Leistungs-Abhängigkeit beschrieben werden, um auch bei geringen Geschwindigkeiten diese critical dimensions zu erreichen. In weiterführenden Arbeiten sollen damit auch gekrümmte Oberflächen gezielt strukturiert werden können.

4.3 Verringerung der Linienabstände

Die critical dimensions beschreiben die kleinstmöglichen Strukturen, die mit Hilfe eines lithografischen Verfahrens erzielt werden können [145]. Dabei spielt es keine Rolle, ob diese aktiv erzeugt werden oder nicht. Daher besteht durchaus die Möglichkeit die critical dimensions zu verringern, indem man zwei lithografisch erzeugte Strukturen so nah aneinander führt, dass die Lücke zwischen diesen Strukturen, der sogenannte Gap, kleiner als die Strukturen selbst wird. In [146] konnte mit Hilfe der 2PP-Lithografie bereits eine Lücke von etwa 30 nm erzeugt werden. Dabei haben die lithografisch geschriebenen Linien selbst eine Strukturbreite von 1,65 μm .

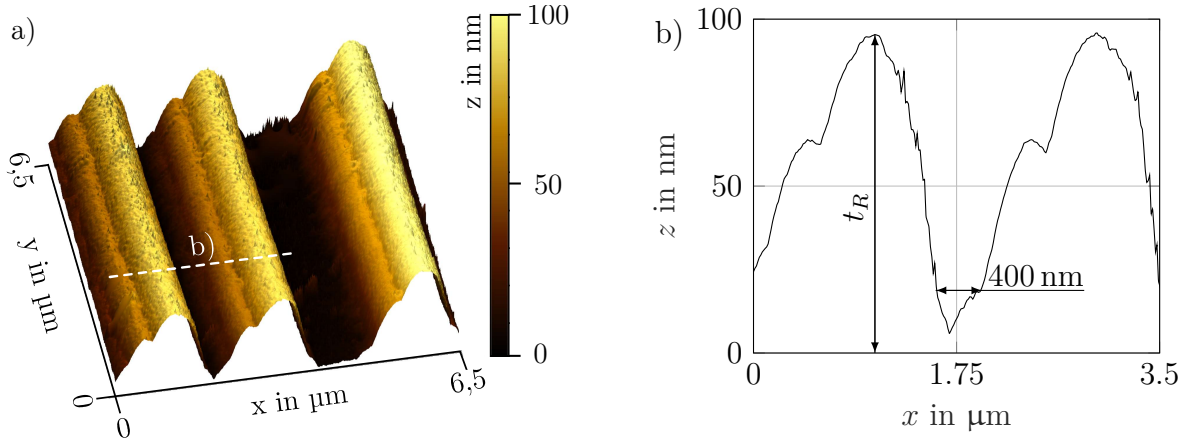


Abbildung 4.11: Verringerung der Strukturierungsabstände:

- a) AFM-Aufnahme der geschriebenen Strukturen bei Verringerung des Pitches.
b) Profilschnitt durch die Strukturen.

Dieser Ansatz kann auch auf die 1PP-Lithografie übertragen werden und bietet großes Potential zur Verringerung der critical dimension mit Hilfe des konfokal-lithografischen Aufbaus. Dazu wird der Abstand der Linien systematisch verringert. Um eine für diesen Versuch nötige, hohe Gleichförmigkeit der Strukturen zu erzielen, wird die Strukturierungsgeschwindigkeit auf $v_m = 500 \mu\text{m/s}$ und die Laserleistung auf $P = 3 \mu\text{W}$ eingestellt. Da die mikroskopische Messung bei diesem Versuch an die Grenzen der Auflösbarkeit trifft, werden die Strukturen mit Hilfe eines AFM gemessen. In Abbildung 4.11, a) ist das entstandene 3D-Profil der erzeugten Strukturen zu sehen. Ein Schnitt durch die ersten zwei Strukturen ist in Abbildung 4.11, b) dargestellt.

Zwischen den Strukturen ist eine schmale Lücke von $g \approx 400 \text{ nm}$ entstanden. Möglicherweise wurde der untere Bereich dieser Lücke mitbelichtet, sodass eine geringe Photolackschicht den Boden bedeckt. Es ist aber auch denkbar, dass der Tastspitzenradius des Cantilever ($r_{TS} \approx 10 \text{ nm}$) zu groß ist, um in die schmalen Zwischenbereiche bei $z = 0 \text{ nm}$ zu gelangen [147]. Das muss in weiterführenden Experimenten genauer analysiert werden. An den linken Flanken der Strukturen sind zusätzliche Erhöhungen zu erkennen. Diese sind unter Umständen auf Rückreflexe des Lasers am Substrat zurückzuführen [147]. Da die Probe niemals exakt orthogonal zum Objektiv ausgerichtet ist, treten diese Effekte auch nur an einer Seite der Strukturen auf. Weitere Untersuchungen zu dieser Thematik sind zu diesem Zeitpunkt noch nicht geführt worden. Der Versuch zeigt aber, dass es durch die Verringerung der Strukturabstände mit dem konfokal-lithografischen Aufbau möglich ist, sehr geringe Lücken zu erzeugen. Die critical dimensions dieses Verfahrens sollten sich mit verringernder Lackschichtdicke t_R noch signifikant verbessern lassen.

5

Weiterführende Arbeiten

Im Rahmen dieser Arbeit konnten wichtige Ansätze für die Anwendung des Direct Laser Writing-Verfahrens in Kombination mit *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen* erarbeitet und umgesetzt werden. Diese Grundlagen sollen zukünftig gezielt genutzt werden, um die Leistungsfähigkeit des Mess- und Strukturierungsprozesses weiter zu verbessern und neue Möglichkeiten der lithografischen Präzisionsbearbeitung, sowohl auf planaren als auch auf gekrümmten Oberflächen, zu eröffnen. Das Konzept des Graduiertenkollegs eröffnet die Chance, über einen längeren Zeitraum einen Forschungsansatz zu verfolgen und damit die hier gelegten Grundlagen fortzuführen. Deshalb werden in diesem Kapitel einige Vorschläge für weiterführende Arbeiten als Perspektive für die zweite Generation des Graduiertenkollegs *NanoFab* aufgezeigt.

5.1 Optimierung des konfokalen Messsystems

In dieser Arbeit wurde das Basiskonzept und die grundlegende Entwicklung des konfokalen Abstandssensors vorgestellt. Zur Optimierung seiner messtechnischen Eigenschaften soll insbesondere die soft- und hardwareseitige Weiterentwicklung forciert werden.

Hinsichtlich der regelungstechnischen Einbindung des Sensors in die *NPMM* sind weitere Untersuchungen erforderlich. Die Reglerparameter der unterschiedlichen Nanosensoren werden vor einer Messung an die Maschinensteuerung übergeben. Diese werden aus einer entsprechenden Datenbank geladen. Zweckgebunden wurden für den konfokalen Sensor zunächst die Reglerparameter des Fokussensors verwendet, die bereits zufrie-

denstellende Ergebnisse lieferten. Anhand verschiedener Stufenmessungen ist aber zu erkennen, dass der Sensor bei jedem Linienscan eine geringe systematische Abweichung von wenigen Nanometern entlang der Z-Achse zum vorherigen Linienscan aufweist (vgl. Abb. 2.18). Dieser Effekt tritt unter Verwendung des Fokussensors nicht auf [131]. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Reglerparameter des Fokussensors nicht optimal auf den konfokalen Sensors abgestimmt sind. In weiterführenden Arbeiten ist eine Anpassung dieser Reglereinstellungen zu empfehlen, um so die Qualität der Messung zu verbessern. In Hinblick auf eine Erhöhung des messbaren Winkelbereichs ist dies unbedingt erforderlich, da in Zukunft der Schwerpunkt auf die Messung und Strukturierung von gekrümmten Oberflächen, wie z. B. Sphären, Asphären aber auch Freiformflächen gelegt werden soll.

5.2 Erhöhung des lateralen Auflösungsvermögens

Die laterale Auflösung des Messsystems wird in der Theorie nach dem Rayleigh-Kriterium k_R durch die Wellenlängen λ_1 und λ_2 der Messlaser und die numerische Apertur NA des Objektivs limitiert. Durch die gezielte Änderung dieser Parameter kann das laterale Auflösungsvermögen gesteigert werden. Dazu sind folgende Möglichkeiten denkbar.

Eine Verringerung der Messwellenlängen sollte auf die Vereinbarkeit mit dem Direct Laser Writing-Prozess abgestimmt werden. Nach Rücksprache mit dem Hersteller des *mr-DWL*-Resists reagiert der Photolack nur in einem spektralen Bereich von $300\text{ nm} \leq \lambda \leq 410\text{ nm}$ [144, 148]. Darüber hinaus sollte keine Resistpolymerisation mehr stattfinden. Der Wechsel der Wellenlängen muss also unter Beachtung dieser Restriktion erfolgen. Auf dieser Grundlage wurden bereits Laserdioden mit kürzeren Wellenlängen ausgewählt, die die bisherigen Laser ablösen und eine verbesserte laterale Auflösung ermöglichen können. Zur Verfügung stehen hierfür die Wellenlängen $\lambda_3 = 517,8\text{ nm}$, $\lambda_4 = 488,7\text{ nm}$ und $\lambda_5 = 448,9\text{ nm}$. Die Laserdioden können direkt an die bereits verwendeten Temperatur- und Laserdiodencontroller der Sensoreinheit angeschlossen werden (vgl. Kap. 2.3.2). Entsprechende Y-Koppler zur Kombination zweier dieser Wellenlängen in derselben Faser stehen ebenfalls zur Verfügung.

Die funktionalen Eigenschaften des Messsystems werden durch die Auswahl des entsprechenden Objektivs bestimmt. Neben den bereits untersuchten Mikroskopobjektiven aus Kapitel 2.5.1 gibt es eine Vielzahl kommerzieller Objektive, die für den Einsatz im konfokalen Sensor in Frage kommen und auf ihre Funktionalität geprüft werden

können. Es muss jedoch untersucht werden, ob die chromatische Aberration im Bereich der zwei Wellenlängen für das differentielle Prinzip des konfokalen Sensors ausreichend groß ist. Da es in der Regel dazu jedoch keine Herstellerangaben gibt, muss die Eignung durch Experimente ermittelt werden. Dazu konnte bereits das Objektiv *MUC11150 CFI TU Plan Apo EPI 150x* der Firma *Nikon* getestet werden [149]. Mit einer numerischen Apertur von $NA = 0,9$ verringert sich die laterale Auflösung für die kritischen Wellenlänge $\lambda_2 = 662 \text{ nm}$ nach Formel 2.14 zu

$$d_S = 2 \cdot K_R = 2 \cdot \frac{0,61 \lambda_2}{NA} = 1,22 \cdot \frac{662 \text{ nm}}{0,9} = 897,4 \text{ nm}. \quad (5.1)$$

Für den Einsatz im konfokalen Sensor kommt dieses Objektiv bei den derzeitigen Wellenlängen jedoch nicht in Frage. Die Experimente haben gezeigt, dass die Farbkorrektur des Objektivs so unvorteilhaft ist, dass sich kein auswertbarer sensorischer Arbeitsbereich einstellt.

In weiterführenden Untersuchungen ist daher zu prüfen, ob sich unter Verwendung der anderen Laserwellenlängen λ_3, λ_4 und λ_5 eine geeignete Kennlinie einstellen lässt. Durch die Kombination dieser Wellenlängen mit der numerischen Apertur des Objektivs kann die theoretische Auflösung sogar bis zu

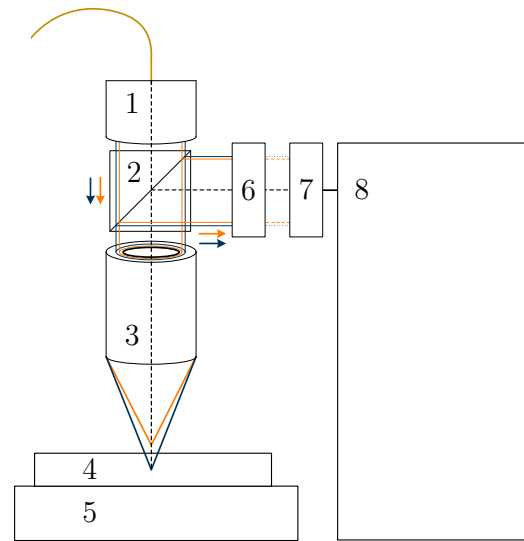
$$d_S = 2 \cdot K_R = 2 \cdot \frac{0,61 \lambda_5}{NA} = 1,22 \cdot \frac{448,9 \text{ nm}}{0,9} = 608,5 \text{ nm} \quad (5.2)$$

verbessert werden. Darauf aufbauend kann das Objektiv *MUE12900 CFI TU Plan Fluor Epi 100x* auf seine Funktionalität überprüft werden [150]. Dieses besitzt ebenfalls eine numerische Apertur von $NA = 0,9$ und erzielt damit die gleiche laterale Auflösung, wie das zuvor getestete 150×-Objektiv [149]. Darüber hinaus sind auch Objektive auf Immersionsbasis denkbar, wodurch numerische Aperturen von $NA > 1$ ermöglicht werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Auflösung besteht in der bildseitigen Auswertung des reflektierten Messstrahls durch Fourier-Scatterometrie. In der Scatterometrie wird das von der Probe gebeugte Licht für eine Rekonstruktion der Objektoberfläche genutzt, um so eine Auflösung unterhalb der Beugungsbegrenzung zu ermöglichen [151]. Ein spezieller Ansatz dieses Verfahrens, die Coherent Fourier Scatterometry, wird bereits im *IPMS* verfolgt und ist in [152] beschrieben. Hier wird das stark fokussierte und von der Probenoberfläche reflektierte Licht mit einem *Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor* detektiert und die aufgenommenen Daten in entsprechende Zernike-Koeffizienten zerlegt. Diese repräsentieren die Abbildungsfehler des optischen Systems. In [152] konnte

Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau des konfokalen Sensorkopfes mit bildseitig angebrachtem Wellenfrontsensor. Mit Hilfe der Coherent Fourier Scatterometry ist es möglich die laterale Auflösung des Messsystems zu verbessern und lithografische erzeugte Strukturen direkt im selben Aufbau zu vermessen [152].

- 1 Fokussierkollimator der Messwellenlängen
- 2 Strahlteilerwürfel
- 3 Objektiv
- 4 Probe
- 5 Nanopositionier- und Nanomessmaschine
- 6 Wellenlängenseparator
- 7 Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor
- 8 Bildverarbeitungs- und Auswerteeinheit



eine starke Korrelation einiger dieser Koeffizienten mit dem abgetasteten Profil nachgewiesen werden. Durch die Auswertung der Wellenfronten und der entsprechenden Zernike-Koeffizienten kann so eine laterale Auflösung von $R_{lat} \leq 100 \text{ nm}$ erzielt werden [153]. Die Verwendung des Wellenfrontsensors kann durch den konfokalen Aufbau nach Abbildung 2.5 als modulare Erweiterung, bspw. an Stelle der Kamera, realisiert werden. Da der konfokale Aufbau ohnehin mit zwei Wellenlängen arbeitet, ist es sogar denkbar den Informationsgehalt dieses Ansatzes zu vergrößern, indem die Wellenlängen bildseitig wieder getrennt und unabhängig voneinander ausgewertet werden. In Abbildung 5.1 ist der Sensorkopf des konfokalen Sensors mit einem bildseitig integrierten Wellenfrontsensor schematisch dargestellt. Die Kombination des konfokalen Sensors mit der bildseitig angewandten Scatterometrie führt dazu, dass das Messsystem über die lithografische Anwendung hinaus, direkt die erzeugten nanoskaligen Strukturen vermessen und charakterisieren kann.

5.3 Kompensation der oberflächenwinkelabhängigen Messabweichungen

Wie in Kapitel 3.2.2.4 beschrieben, ist die Erarbeitung eines theoretischen Ansatzes zur Kompensation der oberflächenwinkelabhängigen Messabweichung von vielen Einflussparametern abhängig. Um ein entsprechendes und zuverlässiges mathematisches Modell aufzustellen, ist es unbedingt nötig, alle einfließenden Abhängigkeiten zu erfassen. Zu den bereits bekannten Einflussgrößen gehören der Reflektivitätskoeffizient ρ der Probe,

die Verfahrensgeschwindigkeit v_M und die numerische Apertur NA des Objektivs. Außerdem ist die Messabweichung vom Funktionsprinzip des optischen Sensors abhängig. Dazu sollten durch weitere Untersuchungen noch weitere Einflussgrößen adressiert, experimentell untersucht und in das mathematische Modell eingearbeitet werden.

Für die experimentell zu ermittelnden Vergleichswerte ist es nötig, eine hohe Anzahl von Messreihen auf gekrümmten Oberflächen aufzunehmen. Erfahrungswerte zeigen, dass die Maschinensteuerung im jetzigen Zustand nicht optimal für solche Messreihen ausgelegt ist, da es bei Überschreitung von bestimmten Neigungswinkeln zu undefinierten Zuständen in der Messwertverarbeitung der *Nanopositionier- und Nanomessmaschine* kommen kann. In solchen Fällen greifen die Sicherheitsmechanismen der Steuerung, die zur Abschaltung der Antriebe führen. Hier sind neue Algorithmen für die Maschinensteuerung zu entwickeln und implementieren, um die Aufnahme solcher Messreihen zu erleichtern.

5.4 Optimierung der DLW-Lithografie

Die Verringerung der Resistschichtdicke trägt maßgeblich auch zur Verringerung der critical dimensions bei. Bisher konnte der Photoresist *mr-DWL 0.5* durch eine gezielte Verdünnung auf eine Schichtdicke von $t_R = 100$ nm verringert werden. In [154] wird der Photoresist *mr-P 1201 LIL* für FE-SPL-Anwendungen verwendet, der durch eine 3 : 1-Verdünnung mit *ma-T 1050* auf eine Resistschichtdicke von $t_R = 16$ nm reduziert wird. Diese dünne Resistschicht wird bereits für 2PP Direct Laser Writing-Prozesse bei einer Wellenlänge von $\lambda = 805$ nm verwendet und stellt dadurch auch für 1PP-Strukturierungsversuche bei $\lambda_P = 405$ nm eine gute Alternative dar (siehe dazu Kap. 1.4.2) [155]. In weiteren Versuchen sollte dieser Resist auf seine Eigenschaften für diesen Prozess untersucht werden. Die Ausarbeitung der benötigten Strukturierungsdosis zur Erzielung der critical dimensions steht dabei wieder im Vordergrund. Über die gezielte Wahl der Schwellwertparameter der Laserstrahlung kann eine deutliche Unterschreitung des Rayleigh-Durchmessers erreicht werden. Erste wichtige Ergebnisse dazu werden im Rahmen des Graduiertenkollegs *NanoFab* durch *Weidenfeller* aufgezeigt, die auch für das 1PP Direct Laser Writing angewendet werden können [146].

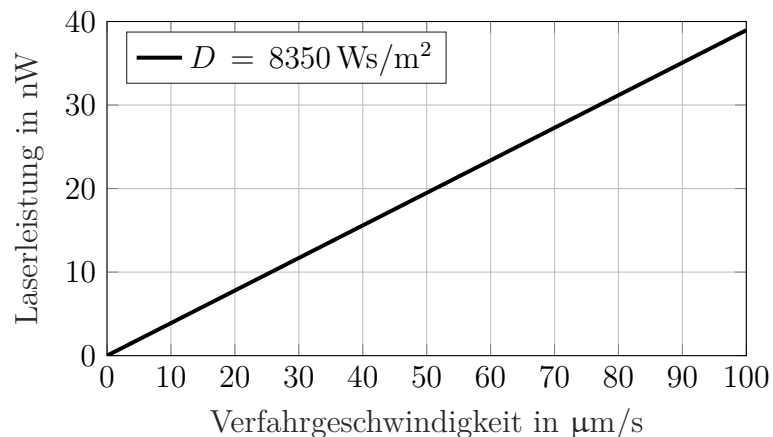
Die bisherigen lithografisch erzeugten Linien nehmen zu Beginn und Ende einer jeden Struktur tropfenförmige Gestalt an. Zurückzuführen ist dieser Effekt auf den Beschleunigungsabschnitt einer jeden Bewegung und die damit eingebrachte temporär erhöhte Belichtungsdosis. Die linearen Strukturen bilden nur den Anfang der geplanten

lithografischen Anwendung. In späteren Verfahren sollen frei wählbare Muster, Gitter oder auch ganze Texte lithografisch erzeugt werden können. Dafür ist es unbedingt notwendig, eine adäquate Trajektorienplanung in die Steuerung zu integrieren, die Verfahrensgeschwindigkeit sensorisch zu erfassen und diese gezielt zur Laserregelung auf eine konstante Belichtungsdosis zu nutzen. Durch diesen Ansatz können unterschiedliche Strukturierungspfade zusammengefügt werden. So sollen in zukünftigen Experimenten Strukturierungsmasken individuell und mit einer möglichst hohen Gleichförmigkeit über den gesamten Bereich erzeugt werden.

5.5 Direct Laser Writing auf gekrümmten Oberflächen

Sobald die Methodik zur Kompensation der systematischen Messabweichungen auf gekrümmten Oberflächen zuverlässig funktioniert, können diese Erkenntnisse genutzt werden, um eine gezielte Strukturierung von Linsen, Freiformen und Asphären zu ermöglichen. Das Spin-Coating-Verfahren kann allerdings bei derartigen Oberflächen keine isotrope Resistschicht erzeugen. Zuverlässigere Ergebnisse können mit dem Spray-Coating-Verfahren erzielt werden. Die entsprechenden Geräte sind am *Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien* an der *TU Ilmenau* vorhanden. Um die Stabilität der Messsignale auch auf gekrümmten Oberflächen zu garantieren, sollte die Mess- und Strukturierungsgeschwindigkeit des konfokalen Sensors konsequenterweise deutlich reduziert und angepasst werden. Daher muss auch die verwendete Laserleistung verringert werden. Im Kapitel 4.2.3.1 wurde für kleinste critical dimensions im Photoresist *mr-DWL 0.1* eine Dosis von $D = 8350 \text{ Ws/m}^2$ ermittelt. Mit Hilfe der in Abbildung 5.2 dargestellten Geschwindigkeitsabhängigkeit kann die erforderliche Laserleistung bestimmt werden.

Abbildung 5.2: Geschwindigkeits-Leistungs-Abhängigkeit zur Erzeugung der critical dimensions im Photoresist *mr-DWL 0.1* bei geringen Geschwindigkeiten. Die geringe Laserleistung kann unter Zuhilfenahme spezieller Neutralsichtfilter erreicht werden (vgl. dazu auch Abb. 4.9).



Bei der Strukturierung auf gekrümmten Oberflächen ist es in jedem Fall vorteilhaft, mit senkrecht einfallender Belichtung zum Objekt zu arbeiten. Perspektivisch ist deshalb für die Strukturierung solcher Oberflächen die Verwendung zusätzlicher Bewegungsachsen des optischen Strukturierungs- und Messkopfes auf Basis des Sensorrotationssystems von *Fern* und *Schienen* möglich (vgl. Kap. 3.2.1). Darüber hinaus ist es denkbar, aufgrund der ohnehin zu hohen Leistung des Lithografielasers, die gegenwärtige punktweise und serielle Belichtung mit einer zusätzlichen Möglichkeit der flächenhaften Belichtung, beispielsweise durch Interferenzlithographie nach *Fischer* oder *Cao* zu kombinieren [156, 157]. Die Synergien zwischen den einzelnen Projektdisziplinen unterstreichen nochmals die Relevanz und die Vorteile des Graduiertenkollegs *NanoFab*.

6

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit werden neue Entwicklungen und Untersuchungen geführt, die die Integration einer lithografischen Strukturierungsmethode, dem 1PP Direct Laser Writing, in *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen* zum Ziel hat. Dazu wird ein optischer Nanosensor mit einem lithografischen Strukturierungslaser kombiniert. Durch diese Synthese können resistbeschichtete Proben sensorisch angetastet, maschinell positioniert und lithografisch bearbeitet werden. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen zeigen, dass der verwendete Fokussensor keine zufriedenstellenden Ergebnisse für diese Anwendung erzielt. Dementsprechend wird die Entwicklung eines neuen optischen Sensors forciert, der gezielt im Lithografieprozess Anwendung finden wird. Dieser neue chromatisch konfokale Sensor mit fasergekoppeltem Sensorkopf erzielt hervorragende messtechnische Ergebnisse. Die laterale Auflösung des Messsystem beträgt weniger als $2\text{ }\mu\text{m}$. In Kombination mit der *Nanopositionier- und Nanomessmaschine* wird axial eine Auflösung von etwa 1 nm erzielt. Die experimentell ermittelte Standardabweichung des Messsystems beträgt $\pm 5\text{ nm}$. Das sensorische System ist in der Lage die Strukturierungsebene, auch bei hohen Verfahrensgeschwindigkeiten bis 5 mm/s , zuverlässig anzutasten und somit einen hohen lithografischen Durchsatz zu ermöglichen.

Basierend auf diesen Ergebnissen, wird der lithografische Strukturierungslaser mit der Wellenlänge $\lambda_P = 405\text{ nm}$ in den konfokalen Aufbau integriert. Systematisch werden die beeinflussenden Prozessparameter zur Erzeugung kleinster Strukturbreiten optimiert, sodass critical dimensions von ca. 600 nm erzielt werden. Die Gleichförmigkeit der

Strukturbreiten über die verhältnismäßig enormen Strukturlängen, betonen nochmals die Bedeutsamkeit dieser Lithografiertechnik in Kombination mit *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen*. Darüber hinaus zeichnet sich ein hohes Potential in der Strukturierung optischer Bauelemente ab. Die Lithografie auf solchen gekrümmten Oberflächen gestaltet sich in vielerlei Hinsicht, von der Resistaufragung bis zur Strukturierung, sehr viel komplexer, als es auf ebenen Proben der Fall ist. Um die Ergebnisse der planaren Lithografie auch auf gekrümmte Oberflächen zu übertragen, werden in dieser Arbeit die grundlegenden Untersuchungen dazu vorgenommen und Möglichkeiten zur Umsetzung des Verfahrens konzipiert.

Vergleichbare kommerzielle Geräte für planare Direct Laser Writing-Anwendungen erzielen Strukturgrößen von 300 nm (vgl. Kap. 1.4.2). Durch die aufgeführten Ideen und Konzepte zur weiteren Verbesserung des lithografischen und messtechnischen Systems, ist die Erreichbarkeit solcher Strukturgrößen durch weitere Experimente durchaus denkbar. Weiterführende Arbeiten sollen das volle Potential dieser Technik auf Basis von *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen* ausschöpfen. Dazu sollten in Zukunft zunächst Konzepte zur Regelung der Strukturierungsdosis erarbeitet und diese im Prozessablauf integriert werden. Darüber hinaus ist es wichtig, die Reglereinstellungen des konfokalen Sensors anzupassen. Die im Kapitel 5.4 vorgeschlagene Verringerung der Resistschichtdicke auf < 20 nm wird voraussichtlich zu einer weiteren signifikanten Verbesserung der lithografischen Strukturbreiten führen. Daher sollte dieser Ansatz unbedingt weiter verfolgt und auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse von *Hofmann* und *Weidenfeller* auf die 1PP-Lithografie übertragen werden [154, 155]. Andere Ansätze zur Verringerung der critical dimensions, bspw. durch die Erzeugung von Gaps zwischen den Strukturen oder durch die sogenannte Mehrfachstrukturierung, müssen grundlegend untersucht und auf ihre Anwendbarkeit im 1PP-Prozess überprüft werden [158]. Insbesondere diese zwei Techniken besitzen ein hohes Potential, Strukturen unterhalb der Beugungsbegrenzung zu erzeugen. Für alle angestrebten strukturerzeugenden Techniken ist die exakte Charakterisierung des lithografischen Laserstrahlprofils wichtig. Dadurch ist es möglich, die Schwellwertparameter präzise auszulegen, die zur Erzielung geringerer critical dimensions nötig sind.

Parallel dazu sollten weitere messtechnische Untersuchungen erfolgen, die die oberflächenwinkelabhängige Messabweichung präzise beschreiben. Die in dieser Arbeit durchgeführten Erstuntersuchungen müssen ausgedehnt und auch auf bisher unbekannte Einflussgrößen ausgeweitet werden. Erst wenn die Abweichungen optischer Messungen auf gekrümmten Proben kontrollier- und kompensierbar sind, ist die Aus-

weitung des lithografischen Prozesses auf solche Oberflächen sinnvoll. Diese Anwendung ist aufgrund der Präzision der *NPMM* und ihres großen Bewegungsbereichs von hoher Bedeutsamkeit in Hinblick auf die Anwendungsbereiche dieser Technik. Die Möglichkeit einer präzisen maskenlosen Mikro- und Nanostrukturierung, auch auf großen optischen Bauelementen, bei einer gleichzeitigen hohen strukturellen Gleichförmigkeit, weist für den lithografischen Prozess auf Basis der *Nanopositionier- und Nanomessmaschinen* ein gewisses Alleinstellungsmerkmal aus.

Um die zu erzielenden beugungsbegrenzten Strukturen präzise und innerhalb der *NPMM* charakterisieren zu können, soll in Zukunft der Ansatz der bildseitigen Fourier-Scatterometrie Anwendung finden. Neben der Prüfung weiterer Objektive und der Verkürzung der sensorischen Wellenlängen, sollte dieses Prinzip streng weiter verfolgt und in projektübergreifender Zusammenarbeit auf die Anwendbarkeit im konfokalen System untersucht werden.

Durch die Umsetzung der aufgeführten Hinweise, soll zukünftig ein gesamtheitliches Konzept zur maskenlosen Erzeugung und Vermessung mikro- und nanodimensionaler Strukturgrößen auf planaren und gekrümmten Oberflächen entstehen.

Literaturverzeichnis

- [1] E. Clayton Teague. The National Institute of Standards and Technology molecular measuring machine project: Metrology and precision engineering design. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 7(6):1898, nov 1989. doi: 10.1116/1.584688.
- [2] Kiyoshi Takamasu, Satoshi Ozawa, Takayuki Asano, Akihiro Suzuki, Ryoshu Furutani, und Shigeo Ozono. Basic concepts of nano-CMM. In *Jpn.-China Bilateral Symp. on Advanced Manufacturing Eng*, volume 155, 1996.
- [3] Yasuhiro Takaya, Satoru Takahashi, Takashi Miyoshi, und Katsumasa Saito. Development of the nano-CMM probe based on laser trapping technology. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 48(1):421–424, 1999.
- [4] Yasuhiro Takaya, Satoru Takahashi, und Takashi Miyoshi. Nano-Positional Detection Using Laser Trapping Probe For Microparts. In *Proc. of ASPE*, volume 584, 2000.
- [5] Gordon E. Moore. Cramming more components onto integrated circuits. *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, 11(3):33–35, sep 2006. doi: 10.1109/n-ssc.2006.4785860.
- [6] M. Mitchell Waldrop. The chips are down for Moore’s law. *Nature*, 530(7589): 144–147, feb 2016. doi: 10.1038/530144a.
- [7] Bekir Tekinderdogan. Engineering connected intelligence : a socio-technical perspective. Technical report, 2016.
- [8] David Müller. Analyse von Graphen-basierten Technologien im Rahmen des strategischen Controllings. *Controlling*, 28(1):52–59, 2016. doi: 10.15358/0935-0381-2016-1-52.
- [9] OptoTech. UPG 2000 CNC. Technical report, OptoTechn Optikmaschinen GmbH, 2017.

- [10] G. Jäger, E. Manske, T. Hausotte, A. Müller, und F. Balzer. Nanopositioning and nanomeasuring machine NPM-200—a new powerful tool for large-range micro- and nanotechnology. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 4(3), 2016. doi: 10.1088/2051-672X/4/3/034004.
- [11] Roman Kleindienst, Ronald Kampmann, Sebastian Stobenau, und Stefan Sinzinger. Hybrid optical (freeform) components - functionalization of nonplanar optical surfaces by direct picosecond laser ablation. *Applied Optics*, 50(19):3221, jun 2011. doi: 10.1364/ao.50.003221.
- [12] Roman Kleindienst, Ronald Kampmann, Sebastian Stobenau, und Stefan Sinzinger. Integriertes Design und Fertigung optischer Bauelemente. *Optik & Photonik*, 8(2):48–51, jun 2013. doi: 10.1002/opph.201300016.
- [13] Chenji Zhang, Gong Cheng, Perry Edwards, Ming-Da Zhou, Siyang Zheng, und Zhiwen Liu. G-Fresnel smartphone spectrometer. *Lab on a Chip*, 16(2):246–250, 2016. doi: 10.1039/c5lc01226k.
- [14] Diming Zhang und Qingjun Liu. Biosensors and bioelectronics on smartphone for portable biochemical detection. *Biosensors and Bioelectronics*, 75:273–284, jan 2016. doi: 10.1016/j.bios.2015.08.037.
- [15] Chun-Ying Lin und Jin-Chern Chiou. Design and fabrication of MEMS-based thermally-actuated image stabilizer for cell phone camera. *Solid-State Electronics*, 77:64–71, nov 2012. doi: 10.1016/j.sse.2012.05.013.
- [16] H. Büchner, G. Jäger, U. Gerhardt, und K. Hasche. Entwicklung eines 3D-laserinterferometrischen Nanomeßsystems für den Abbéfehlerfreien Einbau in Rasterkraftmikroskope. *tm - Technisches Messen*, 66(12), jan 1999. doi: 10.1524/teme.1999.66.12.504.
- [17] G. Jäger, T. Hausotte, E. Manske, H.-J. Büchner, R. Mastilo, N. Dorozhovets, und N. Hofmann. Nanomeasuring and nanopositioning engineering. *Measurement*, 43(9), 2010. doi: 10.1016/j.measurement.2010.04.008.
- [18] Bengt Edlén. The Dispersion of Standard Air. *Journal of the Optical Society of America*, 43(5):339, may 1953. doi: 10.1364/josa.43.000339.
- [19] A. Amthor, S. Zschack, und C. Ament. Position control on nanometer scale based on an adaptive friction compensation scheme. In *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. IEEE, nov 2008. doi: 10.1109/iecon.2008.4758361.

- [20] A Amthor and J Werner and A Lorenz and S Zschaeck and C Ament. Asymmetric motion profile planning for nanopositioning and nanomeasuring machines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 224(1):79–92, feb 2010. doi: 10.1243/09596518jsce826.
- [21] Stephan Zschäck, Johannes Klöckner, Irina Gushchina, Arvid Amthor, Christoph Ament, und Wolfgang Fengler. Control of nanopositioning and nanomeasuring machines with a modular FPGA based data processing system. *Mechatronics*, 23(3):257–263, apr 2013. doi: 10.1016/j.mechatronics.2012.12.003.
- [22] Ernst Abbe. Messapparate für Physiker. In *Zeitschrift für Instrumentenkunde - Organ für Mittheilungen aus dem gesammten Gebiete der wissenschaftlichen Technik*.
- [23] Ralf Förster und Anna Förster. *Einführung in die Fertigungstechnik*. Springer Berlin Heidelberg, 2018. doi: 10.1007/978-3-662-54702-1.
- [24] E. Manske, G. Jäger, R. Füßl, F. Balzer, und H. Baitinger. Nanomess- und Nanopositioniergeräte für die nanometergenaue Positionierung und Messung von Oberflächen und Strukturen. 2012. doi: 10.5162/SENSOREN2012/4.3.4.
- [25] E. Manske, T. Hausotte, R. Mastylo, T. Machleidt, K.-H. Franke, und G. Jäger. New applications of the nanopositioning and nanomeasuring machine by using advanced tactile and non-tactile probes. *Measurement Science and Technology*, 18(2):520–527, 2007. ISSN 0957-0233. doi: 10.1088/0957-0233/18/2/S27.
- [26] Yoshio Yoshida, Takahiro Miyake, Yukio Kurata, und Toshio Ishikawa. Three-beam CD optical pickup using a holographic optical element. SPIE Proceedings, pages 58–65. SPIE, 1991. doi: 10.1117/12.26133.
- [27] Rostyslav Mastylo, Denis Dontsov, Eberhard Manske, und Gerd Jager. A focus sensor for an application in a nanopositioning and nanomeasuring machine. SPIE Proceedings, page 238. SPIE, 2005. doi: 10.1117/12.612887.
- [28] Shinya Yoshida und Yukio Kurata. Optical pickup employing a hologram-laser-photodiode unit. In *Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage 1999*. SPIE, jun 1999. doi: 10.1117/12.997554.
- [29] Jiubin Tan und Fusheng Wang. Theoretical analysis and property study of optical focus detection based on differential confocal microscopy. *Measurement science and technology*, 13(8):1289, 2002.

- [30] Feng Zhu und Jian-Yong Ma. Direct Laser Writing Facility for Fabrication of Submicron Mask. *Chinese Physics Letters*, 31(4), 2014. doi: 10.1088/0256-307X/31/4/048102.
- [31] Rostyslav Mastylo. *Optische und taktile Nanosensoren auf der Grundlage des Fokusverfahrens für die Anwendung in Nanopositionier- und Nanomessmaschinen*. PhD thesis, TU Ilmenau, 2011.
- [32] Eberhard Manske, Gerd Jäger, und Tino Hausotte. A Multi-Sensor Approach for Complex and Large-Area Applications in Micro and Nanometrology. *NCSLI Measure*, 7(2):44–50, jun 2012. doi: 10.1080/19315775.2012.11721597.
- [33] Martin Hofmann, Claudia Lenk, Tzvetan Ivanov, Ivo W. Rangelow, Alexander Reum, Ahmad Ahmad, Mathias Holz, und Eberhard Manske. Field emission from diamond nanotips for scanning probe lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2018(B 36):06JL02–1 – 06JL02–6, 2018. doi: 10.1116/1.5048193.
- [34] Maik Rahlves und Jörg Seewig. *Optisches Messen technischer Oberflächen: Messprinzipien und Begriffe*. Beuth Verlag, 2009. ISBN 3410171339.
- [35] Daniel Kapusi, Torsten Machleidt, Karl-Heinz Franke, und Rainer Jahn. White light interferometry in combination with a nanopositioning and nanomeasuring machine (NPMM). In *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V*. SPIE, jun 2007. doi: 10.1117/12.726114.
- [36] Heinz Niedrig. *Optik*. De Gruyter, 2004. ISBN 3-11-017081-7.
- [37] Ludwig Pietsch. Alois Senefelder Erfinder der Lithographie. In *Alois Senefelder Erfinder der Lithographie*, pages 3–88. Springer Berlin Heidelberg, 1871. doi: 10.1007/978-3-662-30336-8_1.
- [38] P. Schuller-Gotzburg, P. Sattlegger, K. Grossschmidt, und P. Schachner. 3D-Implantatplanung und Stereolithographie-Implantatbohrschablonen. *Stomatologie*, 101(3):55–60, 2004.
- [39] Ernst Kircher, Raimund Girwidz, und Peter Häußler. *Physikdidaktik*. Springer Berlin Heidelberg, 2015. doi: 10.1007/978-3-642-41745-0.
- [40] Wolfgang Menz, Jürgen Mohr, und Oliver Paul. *Microsystem technology*. John Wiley & Sons, 2008.

- [41] L.R. Harriott. Limits of lithography. *Proceedings of the IEEE*, 89(3):366–374, mar 2001. doi: 10.1109/5.915379.
- [42] Karl Rupp. 40 years of microprocessor trend data. *Accedido el*, 15, 2015.
- [43] Gordon E. Moore. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38(8), April 1965.
- [44] Gordon E. Moore. Excerpts from a conversation with Gordon Moore: Moore’s law. *Intel Corporatio*, 2005.
- [45] Kihyun Choi, Hyun Chul Sagong, Wonchang Kang, Hyunjin Kim, Jiang Hai, Miji Lee, Bomi Kim, Mi ji Lee, Soonyoung Lee, Hyewon Shim, Junekeyun Park, Youngwoo Cho, Hwasung Rhee, und Sangwoo Pae. Enhanced Reliability of 7nm Process Technology featuring EUV. In *2019 Symposium on VLSI Technology*. IEEE, jun 2019. doi: 10.23919/vlsit.2019.8776580.
- [46] Scott E. Thompson und Srivatsan Parthasarathy. Moore’s law: the future of Si microelectronics. *Materials Today*, 9(6):20–25, jun 2006. doi: 10.1016/s1369-7021(06)71539-5.
- [47] G. Dan Hutcheson. Moore’s law, lithography, and how optics drive the semiconductor industry. In *Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography IX*. SPIE, mar 2018. doi: 10.1117/12.2308299.
- [48] Kenneth Flamm. Measuring moore’s law: Evidence from price, cost, and quality indexes. Technical report, National Bureau of Economic Research, 2018.
- [49] Ulrich Jonas und Patrick Theato. Glossar zu Begriffen mit Bezug zu Kinetik, Thermodynamik und Mechanismen von Polymerisationen. *Angewandte Chemie*, 121(50):9725–9738, nov 2009. doi: 10.1002/ange.200805608.
- [50] Roger Phillips. Photopolymerization. *Journal of Photochemistry*, 25(1):79–82, may 1984. doi: 10.1016/0047-2670(84)85016-9.
- [51] Harry R Allcock. *Introduction to materials chemistry*. John Wiley & Sons, 2019.
- [52] Miłosz Pawlicki, Hazel A. Collins, Robert G. Denning, und Harry L. Anderson. Zweiphotonenabsorption und das Design von Zweiphotonenfarbstoffen. *Angewandte Chemie*, 121(18):3292–3316, apr 2009. doi: 10.1002/ange.200805257.

- [53] Kwang-Sup Lee, Ran Hee Kim, Prem Prabhakaran, Dong-Yol Yang, Tae Woo Lim, und Sang Hu Park. Two-photon stereolithography. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 16(01):59–73, 2007.
- [54] Alexandros Selimis, Vladimir Mironov, und Maria Farsari. Direct laser writing: Principles and materials for scaffold 3D printing. *Microelectronic Engineering*, 132, 2015. doi: 10.1016/j.mee.2014.10.001.
- [55] Steve Ruzin und Holly Aaron. URL <http://microscopy.berkeley.edu/courses/TLM/2P/>.
- [56] Nga P. Pham, Joachim N. Burghartz, und Pasqualina M. Sarro. Spray coating of photoresist for pattern transfer on high topography surfaces. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15(4):691–697, feb 2005. doi: 10.1088/0960-1317/15/4/003.
- [57] Daniel P. Sanders. Advances in Patterning Materials for 193 nm Immersion Lithography. *Chemical Reviews*, 110(1):321–360, jan 2010. doi: 10.1021/cr900244n.
- [58] Takeaki Ebihara, Marc D. Levenson, Wei Liu, Jim He, Wendy Yeh, Sang Ahn, Toshihiro Oga, Meihua Shen, und Hichem M’saad. Beyond $k_1=0.25$ lithography: 70-nm L/S patterning using KrF scanners. In *23rd Annual BACUS Symposium on Photomask Technology*. SPIE, dec 2003. doi: 10.1117/12.518104.
- [59] Uwe Gerhardt. Persönliche Mitteilung, 2018.
- [60] AZ Electronic Materials. Product Data Sheet: AZ ECI 3000 Photoresist. Technical report, 2019.
- [61] Eugene Hecht. *Optik*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2018.
- [62] Manfred D. Lechner, Klaus Gehrke, Eckhard H. Nordmeier, und U. Guhr. *Makromolekulare Chemie*. Springer, 2003.
- [63] Schäfter + Kirchhoff. Laser Diode Beam Sources. Technical report, 2017.
- [64] R. E. Bedford und G. Wyszecki. Axial chromatic aberration of the human eye. *Journal of the Optical Society of America*, 47(6), June 1957. doi: 10.1364/josa.47.0564_1.
- [65] Eustace L. Dereniak und Teresa D. Dereniak. *Geometrical and Trigonometric Optics*. Cambridge University Press, 2008. doi: 10.1017/cbo9780511755637.

- [66] Bernd Dörband. Abbildungsfehler und optische Systeme. In *Technische Optik in der Praxis*. Springer-Verlag. doi: 10.1007/3-540-26709-3_3.
- [67] Maria Mulisch und Ulrich Welsch. *Romeis - Mikroskopische Technik*. Springer-Verlag, 2015.
- [68] C. Bricot, J. Leheureau, C. Puech, und F. Carvennec. Optical Readout of Videodisc. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, CE-22(4):304–308, 1976. ISSN 00983063. doi: 10.1109/TCE.1976.266827.
- [69] Dmitriï Maksutov. Technologie der astronomischen Optik.
- [70] Hans-Jürgen Gevatter und Ulrich Grünhaupt. *Handbuch der Mess-und Automatisierungstechnik in der Produktion*. Springer-Verlag, 2013.
- [71] P. E. Day P. Kramer, G. Bouwhuis. Apparatus for reading a flat reflecting record carrier with autofocusing means, 1975.
- [72] T. J. Hazerdonk G. Bouwhuis. Opto-electronic Focussing Error Detection Arrangement, 1980.
- [73] M. Minsky. US Patent 3013467. *Microscopy apparatus*, 1957.
- [74] M. Minsky. Memoir on inventing the confocal scanning microscope. *Scanning*, 10(4):128–138, 1988. doi: 10.1002/sca.4950100403.
- [75] Christian Demmler. *Erste klinische Erfahrungen mit einem konfokal arbeitenden Instrument zur Quantifizierung von Linsentrübungen*. PhD thesis, LMU München, 2006.
- [76] Heinz Haferkorn. *Optik: Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*. Wiley-VCH, 2003. ISBN 3-527-40372-8.
- [77] Colin J. R. Sheppard und David M. Shotton. *Confocal laser scanning microscopy*. 1997.
- [78] N. Czarnetzki T. Scherübl. Konfokale mikroskopische Anordnung, 1998.
- [79] Tim Dabbs und Monty Glass. Fiber-optic confocal microscope: FOCON. *Applied Optics*, 31(16):3030, jun 1992. doi: 10.1364/ao.31.003030.
- [80] C.-H. Lee J. P. Wang. Differential confocal microscopy, 1998.

- [81] Peter Lücke, Arndt Last, und Jürgen Mohr. Mikrooptische Sensoren nach dem chromatisch konfokalen Messprinzip. 2006.
- [82] Felix G. Balzer, Uwe Gerhardt, Tino Hausotte, Katja Albrecht, Eberhard Manske, und Gerd Jäger. Application of a novel fibre-coupled confocal sensor in a nanopositioning and nanomeasuring machine. In *12th Euspen International Conference*, 2012.
- [83] Tino Hausotte, Andreas Gröschl, und Janik Schaudé. High-speed focal-distance-modulated fiber-coupled confocal sensor for coordinate measuring systems. *Applied Optics*, 57(14):3907, may 2018. doi: 10.1364/ao.57.003907.
- [84] Andreas Gröschl, Janik Schaudé, und Tino Hausotte. Evaluation of the optical performance of a novel high-speed focal-distance-modulated fibre-coupled confocal sensor. In *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI*. SPIE, jun 2019. doi: 10.1117/12.2526038.
- [85] Andreas Christian Gröschl, Janik Schaudé, und Tino Hausotte. Evaluation und Justierung eines neuartigen, hochfrequent fokusabstandsmodulierten, fasergekoppelten, konfokalen Punktsensors für axial geregelte Oberflächenmessungen mit einem Nanokoordinatenmessgerät. *tm - Technisches Messen*, 86(4):216–226, apr 2019. doi: 10.1515/teme-2019-0008.
- [86] Nektarios Koukourakis, Markus Finkeldey, Moritz Stürmer, Christoph Leithold, Nils C. Gerhardt, Martin R. Hofmann, Ulrike Wallrabe, Jürgen W. Czarske, und Andreas Fischer. Axial scanning in confocal microscopy employing adaptive lenses (CAL). *Optics Express*, 22(5):6025, mar 2014. doi: 10.1364/oe.22.006025.
- [87] Martí Duocastella, Giuseppe Vicidomini, und Alberto Diaspro. Simultaneous multiplane confocal microscopy using acoustic tunable lenses. *Optics express*, 22(16):19293–19301, 2014.
- [88] TAG Optics Inc. The Physics behind TAG Optics’ Technology and the Mechanism of Action of using Sound to shape Light. Technical report, 2013.
- [89] J. Belkner. Persönliche Mitteilung, 2019.
- [90] T. Polster, S. Leopold, und M. Hoffmann. Airborne particle generation for optical tweezers by thermo-mechanical membrane actuators. In *Smart Sensors, Actuators, and MEMS V*, volume 8066. International Society for Optics and Photonics, 2011.

- [91] R. Schmitt, M. Uekita, und K. Vielhaber. Focus Sensor with integrated high-range slope measurement. *Measurement Science and Technology*, 20(11), October 2009. doi: 10.1088/0957-0233/20/11/117003.
- [92] Curtis D. Kissinger und Bradford Howland. Fiber optic displacement measuring apparatus, February 24 1976. US Patent 3,940,608.
- [93] S. Shimokawa, K. Okabe, und T. Nakamura. Focus detection unit and optical measuring instrument having the same, 2002.
- [94] T. Scheruebl und N. Czarnetzki. Confocal microscopic device, 2004.
- [95] E. A. Rossi. Apparatus and method for automatic alignment in an optical system and applications, 2015.
- [96] L. A. Cacace. An Optical Distance Sensor: Tilt robust differential confocal measurement with mm range and nm uncertainty. 2009.
- [97] Willem Dirk Van Amstel, Leonard Antonino Cacace, und Rens Henselmans. Optical distance sensor with tilt error correction, January 6 2015. US Patent 8,928,891.
- [98] Liang-Chia Chen, Duc Trung Nguyen, und Yi-Wei Chang. Precise optical surface profilometry using innovative chromatic differential confocal microscopy. *Optics Letters*, 41(24):5660, dec 2016. doi: 10.1364/ol.41.005660.
- [99] Jiubin Tan, Jian Liu, und Yuhang Wang. Differential confocal microscopy with a wide measuring range based on polychromatic illumination. *Measurement Science and Technology*, 21(5):054013, mar 2010. doi: 10.1088/0957-0233/21/5/054013.
- [100] R. Henselmans und P. C. J. N. Rosielle. Free-form optical surface measuring apparatus and method, 2007.
- [101] C. E. Emtman und Y. Xie. Multiple measuring point configuration for a chromatic point sensor, 2013.
- [102] W. P. Kuhn und P. C. Baker. Distance measuring confocal microscope, 1998.
- [103] Aiko K. Ruprecht, Christof Pruss, Hans J. Tiziani, Wolfgang Osten, Peter Lucke, Arndt Last, Jurgen Mohr, und Peter Lehmann. Confocal micro-optical distance sensor: Principle and design. SPIE Proceedings, page 128. SPIE, 2005. doi: 10.1117/12.612008.

- [104] E. Shafir und G. Berkovic. Expanding the realm of fiber optic confocal sensing for probing position, displacement, and velocity. *Applied Optics*, 45(30):7772, oct 2006. doi: 10.1364/ao.45.007772.
- [105] Verein Deutscher Ingenieure. *VDI 2221 Methodik zum Entwicklen und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. VDI Verlag, 1993.
- [106] P. Lehmann. Messeinrichtung mit optischer Tastspitze, 2014.
- [107] Il-Bum Kwon, Dae-Cheol Seo, Chi-Yeop Kim, und Dong-Jin Yoon. Two step signal processing of optical fiber mesh for intruder detection. In *Optics and Photonics in Global Homeland Security IV*. SPIE, apr 2008. doi: 10.1117/12.779688.
- [108] V. Raab und C. Raab. Mehrstufige polarisationskopplung. *Photonik*, May 2004.
- [109] Thorlabs. Pigtailed Laser Diode, SMF (LP642-SF20). Technical report, 2013.
- [110] Thorlabs. Pigtailed Laser Diode, SMF (LP660-SF20). Technical report, 2013.
- [111] Thorlabs. Bandpass Filter CWL=640nm FWHM=10nm. Technical report, 2010.
- [112] Thorlabs. Bandpass Filter CWL=660nm FWHM=10nm. Technical report, 2010.
- [113] Thorlabs. LDM21 5.6mm/9 mm Laser Diode Mount - User Guide. Technical report, 2018.
- [114] Thorlabs. LDC8000 Laser Diode Current Modules - Operation Manual. Technical report, 2016.
- [115] Thorlabs. TED8000 - Operation Manual. Technical report, 2016.
- [116] K. Kanayama, Y. Ando, R. Nagase, S. Iwano, und K. Matsunaga. Advanced physical contact technology for optical connectors. *IEEE Photonics Technology Letters*, 4(11):1284–1287, nov 1992. doi: 10.1109/68.166970.
- [117] Thorlabs. FC/APC to FC/APC Mating Sleeve. Technical report, 2015.
- [118] J. Kirchner, R. Mastlylo, U. Gerhardt, T. Sasiuk, L. Weidenfeller, M. Hofmann, M. Kühnel, S. Sinzinger, und E. Manske. Fasergekoppelter konfokaler Sensor zur exakten Abstandsregelung für maskenlose Lithografieanwendungen. 2019. doi: 10.5162/sensoren2019/p1.14.

- [119] Thomas Sure, Peter Euteneuer, Armin Pausch, Lambert Danner, Gerhard Hoppen, und Wolfgang Vollrath. Ultra high performance microscope objectives: The state of the art in design, manufacturing and testing. In *International Optical Design*. OSA, 2006. doi: 10.1364/iodec.2006.md2.
- [120] Matthias Hillenbrand. *Design of confocal systems for spectral information coding*. PhD thesis, 2016.
- [121] Hans Joachim Eichler, Heinz-Detlef Kronfeldt, und Jürgen Sahm. Linsen und optische Instrumente. In *Springer-Lehrbuch*. Springer Berlin Heidelberg, 2016. doi: 10.1007/978-3-662-49023-5_8.
- [122] Edmund Optics. 15mm DIA., 0.83 Numerical Aperture VIS Coated, Aspheric Lens. Technical report.
- [123] R. I. Mercado. Design of apochromats and superachromats. In *Lens Design: A Critical Review*. SPIE, jul 1992. doi: 10.1117/12.131977.
- [124] Warren J. Smith. *Modern Optical Engineering*. McGraw-Hill Professional, 2000. ISBN 0-07-136360-2.
- [125] Schott. Datenblatt N-SF5. Technical report, 2014.
- [126] Yuki Shimizu, Taiji Maruyama, Shota Nakagawa, Yuan-Liu Chen, Hiraku Matsukuma, und Wei Gao. A PD-edge method associated with the laser autocollimation for measurement of a focused laser beam diameter. *Measurement Science and Technology*, 29(7), May 2018. doi: 10.1088/1361-6501/aac0a6.
- [127] Alfred Schulze Edgar Dietrich. *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation*. Hanser Fachbuchverlag, 2014. ISBN 3446440550.
- [128] Burghart Brinkmann. *Internationales Wörterbuch der Metrologie*. Beuth Verlag, 2012. ISBN 3410224726.
- [129] P De Bièvre. The 2012 international vocabulary of metrology - basic and general concepts and associated terms (VIM). *JcGM*, 200:2012, 2012.
- [130] Akiko Harasaki und James C. Wyant. Fringe modulation skewing effect in white-light vertical scanning interferometry. *Applied Optics*, 39(13):2101, may 2000. doi: 10.1364/ao.39.002101.
- [131] Rostyslav Mastylo. Persönliche Mitteilung, 2019.

- [132] M. Rahlves, B. Roth, und E. Reithmeier. Systematic errors on curved microstructures caused by aberrations in confocal surface metrology. *Optics express*, 23(8): 9640–9648, 2015.
- [133] Ivan Prikryl. Focus sensing apparatus using electrical age to enhance differential focus error signal, September 20 1994. US Patent 5,349,175.
- [134] M. Visscher und K.G. Struik. Optical profilometry and its application to mechanically inaccessible surfaces Part I: Principles of focus error detection. *Precision Engineering*, 16(3):192–198, jul 1994. doi: 10.1016/0141-6359(94)90124-4.
- [135] R. Poprawe. *Lasertechnik für die Fertigung*. Springer-Verlag, 2005. doi: 10.1007/b137581.
- [136] Florian Fern, Roland Füßl, Ralf Schienbein, und Rene Theska. Influence of additional rotational movements on the measurement uncertainty of nanomeasuring, nanopositioning and nanofabrication machines. In *Sensors and Measuring Systems; 19th ITG/GMA-Symposium*. VDE, 2018.
- [137] Ralf Schienbein, Florian Weigert, Florian Fern, René Theska, und Roland Füßl. The implementation of ultra precision rotations to multiaxial nanofabrication machines: challenges and solution concepts. *euspen's 18th International Conference & Exhibition*, 2018.
- [138] Ralf Schienbein, Florian Fern, René Theska, und Roland Füßl. On the development and qualification of multiaxial designs of nanofabrication machines with ultra precision tool rotations. *euspen's 19th International Conference & Exhibition*, 2019.
- [139] Florian Fern, Ralf Schienbein, René Theska, Roland Füßl, Michael Kühnel, Laura Weidenfeller, und Eberhard Manske. In-situ-Messung von Bewegungsabweichungen serieller Rotationsachsen zur Anwendung in Nanomessmaschinen. *tm - Technisches Messen*, 86(s1):77–81, sep 2019. doi: 10.1515/teme-2019-0040.
- [140] Florian Fern. Persönliche Mitteilung.
- [141] A. Nicia. Lens coupling in fiber-optic devices: efficiency limits. *Applied Optics*, 20(18):3136, sep 1981. doi: 10.1364/ao.20.003136.
- [142] Hsiharng Yang, Ching-Kong Chao, Che-Ping Lin, und Sheng-Chih Shen. Micro-ball lens array modeling and fabrication using thermal reflow in two polymer

- layers. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14(2):277–282, nov 2003. doi: 10.1088/0960-1317/14/2/016.
- [143] F. Niklaus, S. Haasl, und G. Stemme. Arrays of monocrystalline silicon micromirrors fabricated using CMOS compatible transfer bonding. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 12(4):465–469, aug 2003. doi: 10.1109/jmems.2003.815833.
- [144] Anja Voigt. Persönliche Mitteilung, August 2018.
- [145] Prosenjit Rai-Choudhury. *Handbook of microlithography, micromachining, and microfabrication: microlithography*. 1997.
- [146] Laura Weidenfeller. *Unveröffentlichte Dissertation*. PhD thesis, TU Ilmenau, 2020.
- [147] Martin Hofmann. Persönliche Mitteilung, 2020.
- [148] Microresist technology. Processing Guidelines - mr-DWL. Technical report, 2017.
- [149] Nikon Corporation. Eclipse LV-N. Technical report, 2013.
- [150] C. Morgner. Persönliche Mitteilung, 2020.
- [151] Wolfgang Osten und Norbert Kerwien. *Optische Messtechnik an den Grenzen zwischen Makro und Nano*, 2005.
- [152] Joerg Bischoff. Scanning wave front detection coherent Fourier scatterometry (SCFS) (unveröffentlicht). 2020.
- [153] Joerg Bischoff. Persönliche Mitteilung, 2020.
- [154] Martin Hofmann, Laura Weidenfeller, Shraddha Supreeti, Stephan Mechold, Mathias Holz, Christoph Reuter, Stefan Sinzinger, Eberhard Manske, und Ivo W. Rangelow. Mix-and-match lithography and cryogenic etching for NIL template fabrication. *Microelectronic Engineering*, 224:111234, mar 2020. doi: 10.1016/j.mee.2020.111234.
- [155] Laura Weidenfeller, Martin R. Hofmann, Johannes Kirchner, Shraddha Supreeti, Ivo W. Rangelow, Stefan Sinzinger, und Eberhard Manske. Micro- and nanofabrication technologies using the nanopositioning and nanomeasuring machines. In *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI*. SPIE, jun 2019. doi: 10.1117/12.2528136.

- [156] David Fischer und Stefan Sinzinger. Control of projection uniformity and fidelity in spatial light modulator-based holography. In *2019 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*. IEEE, mar 2019. doi: 10.1109/icmech.2019.8722858.
- [157] Xinrui Cao und Stefan Sinzinger. Removal of optical aberrations caused by illumination system in fourier ptychography. In *Engineering for a Changing World: Proceedings; 59th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, September 11-15, 2017*, volume 59, 2017.
- [158] Erik Anderson. Double exposure makes dense high-resolution diffractive optics. *SPIE Newsroom*, 2007. doi: 10.1117/2.1200702.0599.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Funktions- und Messprinzip der NPMM	3
1.2	Schematischer Aufbau der Hologram Laser Unit	5
1.3	Differentielles Sensorsignal	5
1.4	Erweiterungen des Basissensors	7
1.5	Photolithografie mit Positiv- und Negativlack	10
1.6	Wachstum der Bauteilanzahl integrierter Schaltungen.....	11
1.7	Entwicklung der Technologieknoten	12
1.8	Energetische Zustände bei 1PP und 2PP	14
1.9	Polymerisationsbereiche bei 1PP und 2PP	14
1.10	Erweiterung des Fokussensors um einen Fabrikationslaser	16
1.11	Durch DLW erzeugte Mäanderstruktur	17
1.12	Dosisuntersuchungen durch Geschwindigkeitsänderungen.....	19
1.13	Qualitative Farbkorrektur der Designwellenlängen	20
1.14	Funktionsweise einer astigmatischen Linse	21
1.15	Qualitatives astigmatisches Differenzsignal	22
1.16	Prinzip der Fokuspunktdetektion nach der Foucaultschen Methode	23
1.17	Qualitatives foucaultsches Differenzsignal.....	23
1.18	Prinzipieller Aufbau eines mechanisch konfokalen Nullpunktsensors	25
1.19	Qualitative Darstellung der mechanisch konfokalen Signalbildung	25
1.20	Prinzipieller Aufbau eines chromatisch konfokalen Nullpunktsensors	26
1.21	Qualitative Darstellung der chromatisch konfokalen Signalbildung.....	27
2.1	Konzept des chromatisch konfokalen Sensors.....	31
2.2	Funktionsstruktur des chromatisch konfokalen Sensorkonzepts	33
2.3	Konkretisierter Entwurf der Sensoreinheit	34
2.4	Aufbau der Sensoreinheit	36
2.5	Schnittansicht des Sensorkopfes mit lithografischer Erweiterung	37
2.6	Geplante Linsenordnung des Objektivs.....	39
2.7	Schnittdarstellung des Objektivs	42
2.8	Aufbau des Objektivs	43
2.9	Sensorkopf des konfokalen Messsystems	43
2.10	Funktionsnachweis des konfokalen Aufbaus	44

2.11	Verbesserung der Signalqualität	45
2.12	Signalverläufe des konfokalen Sensors mit verschiedenen Objektiven	46
2.13	Differenzsignale der unterschiedlichen Objektive	47
2.14	Arbeitsbereich und axiale Auflösung.....	48
2.15	Auswertung der lateralen Auflösung	49
2.16	Experimentelle Ermittlung der lateralen Auflösung des konfokalen Systems	50
2.17	Wiederholt gemessenes Profil eines Spiegels.....	51
2.18	Messung einer definierten Stufenhöhe.....	52
3.1	Normiertes Fokusfehlersignal	56
3.2	Strahlengang durch ein Drei-Linsen-System auf eine geneigte Probe	57
3.3	Prinzipbild des Rotationssystems.....	58
3.4	Extrapolierter Verlauf der chromatischen Aberration.....	59
3.5	Schema des miniaturisierten Sensorkopfes	60
3.6	Konkretisierter schematischer Aufbau des miniaturisierten Sensorkopfes	61
3.7	Geometrische Zusammenhänge in einem Objektiv.....	63
3.8	Strahlverlagerungsfunktionen der <i>Nikon</i> -Objektive	64
3.9	Korrektur des Tastspitzenradius eines taktilen Sensors	66
3.10	Korrigierter Datensatz des taktil gemessenen sphärischen Spiegels	66
3.11	Optische Vergleichsmessung des sphärischen Spiegels.....	67
3.12	Abweichungen zwischen taktiler und optischer Messung	68
4.1	Lithografiesystem	72
4.2	Strukturierung unter Verwendung des konfokalen Aufbaus	73
4.3	Möglichkeit der Schnittweitenkorrektur	74
4.4	Experimentelle Ermittlung der benötigten Schnittweitenkorrektur	75
4.5	Messreihe zur Ermittlung der Kollimatorstellung	75
4.6	Strukturierung nach Anpassung der Fokalebenen	76
4.7	Strukturierung nach Änderung des Resists.....	78
4.8	Strukturierung nach Verringerung der Resistschichtdicke	79
4.9	Laserleistung am Objektivausgang	80
4.10	Strukturierung mit Dosisvariation	81
4.11	Verringerung der Strukturierungsabstände	83
5.1	Schematischer Aufbau mit bildseitig angebrachtem Wellenfrontsensor ..	88
5.2	Geschwindigkeits-Leistungs-Abhängigkeit bei geringen Geschwindigkeiten	90

Tabellenverzeichnis

1.1	Messtechnische Eigenschaften der Nanosensoren	6
2.1	Anforderungsliste der Sensorentwicklung	30
2.2	Sellmeier-Koeffizienten von <i>Schott N-FS5</i>	40
2.3	Messtechnische Eigenschaften des konfokalen Sensors	53
4.1	Prozessierungshinweise verwendeter Photoresiste.....	77

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Typische Einheit	Bedeutung
A	μm^2	Belichtungsfläche
B	μm	Bildgröße
c_0	m/s	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
cd	μm , nm	Critical Dimensions
d	mm, μm	Durchmesser
D	mJ/cm^2 , Ws/m^2	Belichtungs-dosis
DIF	mV	Differenzsignal
E	J, Ws	Energie
FES	mV	Fokusfehlersignal
f_{Koll}	mm	Brennweite des Kollimators
f_{Obj}	mm	Brennweite des Objektivs
g	nm	Lücke zwischen zwei Strukturen
G	μm	Gegenstandsgröße
h	Js	Plancksches Wirkungsquantum
h_S	nm	Stufenhöhe
I_{OP}	mA	Operationsstromstärke
k_1	1	Technologiefaktor der Lithografie
K_R	nm	Rayleigh-Kriterium
n	1	Brechzahl eines optischen Mediums
NA	1	Numerische Apertur
M^2	1	Beugungsmaßzahl
P, P_{min}	mW, μW , nW	Leistung
p	Pa	Luftdruck
p_w	Pa	Wasserdampfpartialdruck
r	mm, μm , nm	Radius
R	μm , nm	Auflösung
t_R	μm , nm	Resistschichtdicke
t	s	Zeit
U, U_{3D}	μm , nm	Messunsicherheit
U_a, U_{Pot}	V	Elektrische Spannung
V, V'	mm	Strahlverschiebung
V_A	mm^3	Arbeitsvolumen
v	mm/s, $\mu\text{m}/\text{s}$	Geschwindigkeit
wd	mm	Working distance

Symbol	Typische Einheit	Bedeutung
α	deg	halber Öffnungswinkel einer Optik
Δ_{sw}	μm	Schnittweitendifferenz
Γ	1	Vergrößerung eines optischen Systems
λ	nm	Wellenlänge
ν	Hz	Schwingungsfrequenz einer Welle
ρ	1	Reflexionsgrad
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Lufttemperatur

Abkürzung	Bedeutung
1PP	Ein-Photon-Polymerisation
2PP	Zwei-Photonen-Polymerisation
AD	Analog-Digital
AFM	Rasterkraftmikroskop
APC	Angled Physical Contact
CD	Compact Disc
CMM	Koordinatenmessmaschine
DVD	Digital Versatile Disc
DLW	Direct Laser Writing
DSP	Digitaler Signalprozessor
EO	<i>Edmund Optics</i>
EUV	Extrem-Ultraviolett
F	Festanforderung
FE-SPL	Feldemissions-Rastersondenlithografie
IC	Integrierter Schaltkreis
LD	Laserdioden
LWD	Long-Working-Distance
LWL	Lichtwellenleiter
M	Mindesanforderung
MM-LWL	Multimodefaser
NIL	Nanoprägelithografie
NPMM	Nanopositionier- und Nanomessmaschine
IPMS	Institut für Prozessmess- und Sensortechnik
PD	Photodiode
PSD	Position Sensitive Device
SM-LWL	Singlemodedefaser
SuK	<i>Schäfter + Kirchhoff</i>
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
SWK	Schnittweitenkorrektur
W	Wunschanforderung

